

DESENVOLVIMENTO DE SONDAS DE CORRENTES PARASITAS PARA
DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE FASE SIGMA EM AÇO INOXIDÁVEL
DUPLEX

Cesar Giron Camerini

Dissertação de Mestrado apresentada 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

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Rio de Janeiro
Janeiro de 2012

DESENVOLVIMENTO DE SONDAS DE CORRENTES PARASITAS PARA
DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE FASE SIGMA EM AÇO INOXIDÁVEL
DUPLEX

Cesar Giron Camerini

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. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.

Dr. Maria Cristina Lopez Areiza, D.Sc.

Prof. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

Prof. Sérgio Souto Maior Tavares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2012

Camerini, Cesar Giron

Desenvolvimento de Sondas de Correntes Parasitas para Detecção e Quantificação de Fase Sigma em Aço Inoxidável Duplex/ Cesar Giron Camerini. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XIX, 121p.: Il.; 29,7cm

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 118-121.

1. Inspeção. 2. Correntes parasitas. 3. Aço inoxidável duplex. 4. Fase sigma. I. Rebello, João Marcos Alcoforado. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

"A melhor maneira que a gente tem de fazer possível amanhã alguma coisa que não é possível de ser feita hoje, é fazer hoje aquilo que hoje pode ser feito."

Paulo Freire

*Dedico este trabalho aos
meus pais, meus irmãos e aos meus
avós, por todo carinho, amor e dedicação.*

Agradecimentos

- Ao professor e orientador João Marcos Alcoforado Rebello, pela paciente orientação ao longo desses dois anos e principalmente pela confiança depositada. Agradeço também pela independência dada, o que me fez compreender parte do trabalho de um pesquisador.*
- À pesquisadora Maria Cristina Lopez Areiza, pela contribuição diária com este trabalho. As suas críticas e sugestões facilitaram bastante o andamento da dissertação.*
- À equipe da universidade polonesa West Pomeranian University of Technology, pelo grande acolhimento e pela grande contribuição científica. Em especial ao professor Stanisław Gratkowski, que com toda a sua preocupação e atenção fez com que a Polônia parecesse mais próxima do Brasil.*
- Ao professor Tomasz Chady, pelo convite, pela confiança depositada e principalmente pelos ensinamentos passados nas discussões quase que diárias durante os cinco meses que estive em seu departamento.*
- Ao amigo e companheiro de trabalho D. Sc. Grzegorz Psuj, que com toda a sua experiência em ensaios magnéticos se mostrou sempre disposto a me ensinar tudo o que sabe sobre o assunto.*
- Aos colegas e amigos do LNDC pelo companheirismo no convívio diário.*
- Aos pesquisadores do CENPES Ricardo de Oliveira Carneval e Agildo Badaró, que sempre se mostraram solícitos em me ajudar, inclusive, me aceitaram como ouvinte em um curso que ministraram sobre correntes parasitas.*
- Aos professores da COPPE pelos ensinamentos passados. Em especial aos professores João Marcos, Payão e Sagrilo, por possuírem uma didática impressionante, conseguindo transformar assuntos complicados em facilmente compreensíveis.*
- Ao meu pai, pelo grande incentivo, companheirismo e por ter ajudado a despertar em mim o interesse na área de ensaios não destrutivos.*
- À minha mãe, por toda a sua dedicação, incentivo e apoio incondicional.*
- Aos meus irmãos Murilo, Flavia e Isabel, e ao Bruno, por fazerem parte do meu dia-a-dia. Sem eles com certeza seria muito mais complicado.*
- Aos meus avós, tios(as), padrinho, primos(as), por sempre me darem força e torcerem por mim.*
- À Mariana, por todo o carinho e por sempre estar disposta a me ajudar com o que fosse preciso, principalmente com as dezenas de ajudas com os arquivos em .pdf.*
- A toda a família Gama, pelos conselhos e por todo o suporte ao longo desses anos.*
- A todos da família Ubá Pendotiba, pela amizade de longos anos. Os momentos juntos para diversão e distração foram e são fundamentais.*
- Aos meus “vizinhos da frente”, por todo o carinho e atenção. Em especial ao Segisfredo Wanderley, que pacientemente leu e corrigiu toda esta dissertação.*
- Ao CNPq pelo apoio financeiro.*
- À Deus pela oportunidade que me foi oferecida.*

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

DESENVOLVIMENTO DE SONDAS DE CORRENTES PARASITAS PARA
DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE FASE SIGMA EM AÇO INOXIDÁVEL
DUPLEX

Cesar Giron Camerini

Janeiro / 2012

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Neste trabalho, a técnica de inspeção por correntes parasitas foi utilizada para a identificação e quantificação da fase sigma na microestrutura do aço inoxidável duplex. Nos experimentos preliminares, uma série de transdutores foram testados inspecionando amostras do aço com diferentes teores de fase sigma precipitada. O desempenho de cada transdutor foi verificado a partir da sua capacidade de diferenciação das amostras com diferentes teores da fase. Os transdutores que foram capazes de diferenciar as amostras possuem grandes dimensões o que dificulta a inspeção de regiões pequenas, como por exemplo, as zonas termicamente afetadas (ZTAs) pelo processo de soldagem. Com o intuito de inspecionar as ZTAs foi feito um aprimoramento em alguns dos transdutores testados. Finalmente, o transdutor desenvolvido não só conseguiu diferenciar as amostras com diferentes porcentagens de fase sigma precipitada como apresenta dimensões pequenas que possibilitam a inspeção de ZTAs.

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

DEVELOPMENT OF EDDY CURRENT PROBES TO DETECTION AND
QUANTIFICATION OF SIGMA PHASE IN DUPLEX STAINLESS STEEL

Cesar Giron Camerini

January / 2012

Advisor: João Marcos Alcoforado Rebello

Department: Metallurgical and Materials Engineering

In the present work, the eddy current technique was applied to recognize and quantify the existence of sigma phase within the microstructure of duplex stainless steel. In the preliminary experiments, a lack of transducer was tested inspecting samples of the steel with different amounts of sigma phase. The performance of each transducer was verified according to inspection result achieved. The transducers that were capable to distinguish the samples present a large dimension, which makes difficult the inspection of small regions, i.e., heated affected zones (HAZ) caused by the welding process. In order to inspect the HAZ an improvement was made in some of the tested transducers. Finally, the transducer developed was able to distinguish samples with different amounts of sigma phase and due to its small dimensions, inspections of HAZ were able to be performed.

SUMÁRIO

Capítulo 1: Introdução	1
Capítulo 2: Revisão Teórica	3
2.1 – Aços Inoxidáveis Duplex	3
2.1.1 – Aspectos Gerais	3
2.1.2 – Precipitações de Fases nos Aços Inoxidáveis Duplex	6
2.1.3 – Fase Sigma (σ)	7
2.2 – Correntes Parasitas.....	11
2.2.1 – Princípio da Inspeção por Correntes Parasitas.....	11
2.2.2 – Profundidade de Penetração Padrão (δ) e <i>Lift-off</i>	12
2.2.3 – Tipos de Sondas de Correntes Parasitas.....	15
2.2.4 – Plano de Impedância	18
2.3 – Simulação da Técnica de Inspeção por Correntes Parasitas a partir do Método dos Elementos Finitos	21
2.3.1 – Modelo Matemático	22
2.3.2 – Projetos de Sondas de Correntes Parasitas a partir de Softwares Comerciais de Simulação que Utilizam o Método dos Elementos Finitos	25
Capítulo 3: Revisão Bibliográfica	27
3.1 – Aplicações Atuais da Técnica de Inspeção por Correntes Parasitas.....	27
3.2 – Bibliografia Relacionada sobre a identificação e quantificação da fase sigma nos aços inoxidáveis duplex	28
3.3 – Justificativa para o Uso de Correntes Parasitas na Quantificação de Fase Sigma em Aços Inoxidáveis Duplex	33

3.4 – Bibliografia Relacionada Sobre a Inspeção do Aço Inoxidável Duplex a partir da Técnica de Ensaios Não Destrutivos por Correntes Parasitas	35
3.5 – Considerações Sobre o Atual Uso da Inspeção por Correntes Parasitas para a Caracterização do Aço Inoxidável Duplex	42
3.6 – Justificativa e Motivação para Desenvolver Sondas para a Inspeção do Aço Inoxidável Duplex.....	43
 Capítulo 4: Materiais e Métodos	44
4.1 – Introdução.....	44
4.2 – Preparação das Amostras	45
4.3 – Sondas Convencionais.....	46
4.3.1 – Sondas Absolutas Comerciais.....	47
4.3.2 – Sondas Absolutas Desenvolvidas	48
4.4 – Sondas não Convencionais	49
4.4.1 – Sonda Five Legs.....	49
4.4.2 – Sonda TRod1 e TRod2.....	51
4.4.3 – Sonda Double ‘C’ Core.....	53
4.5 – Sondas TRod versus Double ‘C’ Core	54
4.6 – Desenvolvimento de Sondas Específicas.....	55
4.7 – Sistemas de medição	56
4.7.1 – Equipamento Comercial ZETEC	56
4.7.2 – Equipamento Comercial OmniScan.....	57
4.7.3 – Equipamento Desenvolvido pela <i>West Pomeranian University of Technology</i> ..	57
.....	57
4.8 – Varredura das Amostras.....	59
 Capítulo 5: Resultados e Discussões.....	61
5.1 – Introdução.....	61

5.2 – Sondas convencionais - Aprimoramento da Sonda Absoluta.....	61
5.2.1 – Verificação do Modelo Simulado	61
5.2.2 – Aprimoramento da Sonda Absoluta de Correntes Parasitas para a Inspeção do Aço Duplex	62
5.3 – Sondas Convencionais - Comparação dos Resultados de Inspeção com as Sondas Absolutas em Equipamentos Comerciais.....	67
5.4 – Sondas Não Convencionais - Inspeção com a sonda Five Legs.....	69
5.5 – Sondas Não Convencionais – Inspeções com as Sondas TRod1 e TRod2	72
5.5.1 – Resultados Sonda TRod1	72
5.5.2 – Resultados Sonda TRod2 e Comparação com a Sonda TRod1	75
5.6 – Resultados Sonda Double ‘C’ Core	80
5.7 – Comparação entre as Inspeções com Circuito Magnético Aberto e Fechado	81
5.8 – Desenvolvimento de Sondas para Inspeção das ZTAs	87
5.8.1 – Simulações para a Otimização da Sonda TRod2	88
5.8.2 – Construção da Sonda em Escala Reduzida	98
5.8.3 – Resultado das Inspeções com as Sondas Desenvolvidas	101
5.8.4 – Definição da melhor Sonda Desenvolvida para Inspeccionar as ZTAs	103
5.8.5 – Análise da Influência da Superfície da Amostra na Inspeção da Sonda STRod2	104
5.9 – Inspeção de Juntas Soldadas	106
5.10 – Proposta de outra configuração da Sonda STRod2 para a inspeção de ZTAs	109
 Capítulo 6: Considerações Finais	 112
 Capítulo 7: Conclusões.....	 114
 Capítulo 8: Sugestões para Trabalhos Futuros.....	 117

<i>Referências Bibliográficas</i>	<i>118</i>
---	------------

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 – Diagrama de fase do aço duplex. Em destaque a microestrutura bifásica característica deste tipo de aço. Imagem metalográfica obtida com microscópio ótico e ataque com NaOH 20%.</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.2 – Microestrutura do duplex desbalanceada com 80% de ferrita (δ) e 20% de austenita (γ). Imagem obtida com microscopia ótica, material atacado com NaOH 20%.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.3 – Diagrama tempo-temperatura-transformação (TTT) para os aços inoxidáveis duplex apontando as diferentes fases que podem precipitar [9].</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.4 – Microestrutura do aço inoxidável duplex envelhecida - Presença da fase sigma e da austenita secundária [17]. Imagem obtida com um MEV%.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.5 – Microestrutura do aço inoxidável duplex envelhecida com aproximadamente 8% de fase sigma precipitada. Imagem obtida com um microscópio ótico. Ataque realizado com NaOH 20%.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.6 – Energia de impacto do aço inoxidável duplex 2205 em função da porcentagem de fase sigma precipitada [19].....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.7 – Princípio da inspeção por correntes parasitas [22]</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.8 – Profundidade de penetração (skin depth)</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.9 – Lift-off - Distância entre a amostra e a sonda [21]</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.10 – A: Enrolamento de uma sonda absoluta sem intraferro. B: Foto de algumas sondas absolutas [22].....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.11 – Sequência de uma inspeção com uma sonda diferencial [22]</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.12 –: Arranjo clássico de uma sonda por reflexão, uma bobina para excitação e outra para recepção. B: Arranjo utilizado para inspecionar simultaneamente as duas faces de uma mesma amostra [22]</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.13 – A: Circuito elétrico que representa uma sonda de correntes parasitas. B: V_R em fase com a corrente e V_L defasado de 90°. C: V_T é a soma de V_R e V_L [21]..</i>	<i>19</i>

<i>Figura 2.14 – Plano de impedância [22]</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.15 – Variação da impedância a partir das variações das propriedades dos materiais [22]</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.16 – Resultado da simulação de sondas de correntes parasitas. A: modelo com simetria de eixo. B: modelo sem simetria de eixo [22]</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.17 - Projeto da sonda em COMSOL Multiphysics</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.18 – Criação da malha</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.1 – Aplicações típicas de inspeções por correntes parasitas. A: Inspeção de tubos de trocadores de calor. B: Inspeção de carenagem de aeronaves.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.2 – Curvas de saturação magnética (m_s) e de leitura do ferritoscópio (F) em função da porcentagem de fase sigma para amostras com e sem deformação [15]</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.3 – Imagem da microestrutura do aço duplex utilizado pelo autor. As regiões mais escuras correspondem à ferrita, as mais claras à fase sigma e a intermediária à austenita [28]</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.4 - Imagem obtida a partir do microscópio de força magnética (MFM). As regiões mais claras indicam os domínios que possuem menor atração magnética [28] .</i> <i>.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.5 - Curva de histerese do aço inoxidável duplex para diferentes períodos de envelhecimento na temperatura de 800°C [29].....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.6 - Equipamentos para caracterização de materiais. A: Microscópio ótico; B: Difração de raio-x; C: Microscópio de força magnética; D: Microscópio eletrônico de varredura (MEV)</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.7 - Esquemático da sonda de correntes parasitas utilizada por Rebello [3] para a caracterização do aço inoxidável duplex.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.8 - Resultado obtido com o analisador de impedância. Em destaque a frequência de operação (4kHz) utilizada na sonda desenvolvida por Rebello [3]</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.9 - Resultado de inspeção de quatro amostras a partir da técnica de correntes parasitas [3]</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.10 - Tela do equipamento utilizado por Todorov [4] apresentando o resultado de inspeção das amostras com diferentes teores de fase sigma [4]</i>	<i>39</i>

<i>Figura 3.11 - Imagens obtidas com um MEV da microestrutura do aço inoxidável duplex com diferentes porcentagens de ferrita e austenita [31].....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.12 – Comportamento dos parâmetros de correntes parasitas em função da porcentagem de fase sigma: (a) Fase; (b) Amplitude. [31].....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.13 – Curva M-H obtidas a partir do VSM (Vibrating Sample Magnetometer). (a) Loop completo destacando a região na qual as correntes parasitas operam. (b) Zoom da região em destaque na imagem ‘a’ [31].....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.1 - Dimensão das amostras do aço inoxidável duplex</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.2 – Sondas comerciais utilizadas para a inspeção dos aços inoxidáveis duplex. A) Sonda absoluta dedicada a caracterização de materiais. B) Sonda absoluta dedicada a identificação de defeitos.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.3 – Foto da sonda absoluta construída neste trabalho</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.4 – Gaussímetro AC Milligauss Meter, modelo UHS. Utilizado para comparar os valores reais, medidos diretamente na sonda com os valores obtidos com as simulações</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.5 – Sonda Five legs. A) Vista lateral e superior do transdutor, onde: $H_1=8$ mm, $H_2=5$ mm, $D_1=9$ mm, $D_2=1,5$ mm, $L_1=3,5$mm. B) Vista da configuração diferencial da sonda [36-38]. C) Vista superior com o sentido da corrente em cada coluna [38]</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.6 – Foto da sonda Five Legs em estágio de construção. Em destaque as bobinas excitadoras e a bobina receptora.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.7 – Configurações TRod1 e TRod2</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.8 – Seção das sondas e o dimensional. $C_H=12$ mm, $E_w=8$ mm, $C_w=3$ mm, $S_s=2$ mm, $E_H=2$ mm, $S_w=1,5$mm, $S_H=1,0$ mm [39]</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.9 – Fotos da sonda TRod1</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.10 – Sonda Double ‘C’ Core.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.11 – Configuração das sondas TRod2 e Double ‘C’ Core. Em destaque o fluxo magnético gerado pelas sondas. A) Circuito magnético aberto. B) Circuito magnético fechado</i>	<i>55</i>

<i>Figura 4.12 – Equipamento comercial de correntes parasitas. ZETEC, modelo: MIZ-21B [40].....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.13 – Equipamento comercial OmniScan MX ECA [41].....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.14 – Equipamento desenvolvido pela West Pomeranian University of Technology. a) Diagrama de blocos. b) Foto do equipamento. [42]</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.15 – Vista frontal da amostra com o percurso de varredura das sondas não convencionais em vermelho</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.16 – Mesa utilizada para fazer as varreduras nas amostras. Em destaque o dispositivo com molas para manter os sensores sob pressão nas amostras.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.1 - Densidade de fluxo magnético em função do lift-off. Valores adquiridos com o gaussímetro (em azul) em comparação com o resultado obtido via COMSOL (em vermelho)</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.2 – Efeito da quantidade de carbono na permeabilidade magnética para aços na temperatura ambiente [33].....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.3 – Modelo em COMSOL das sondas de correntes parasitas. A: Modelo com intraferro de baixa permeabilidade. B: Modelo com intraferro de alta permeabilidade. magnética</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.4 –Comparação entre as sondas simuladas. A linha azul representa a sonda com o intraferro com alta porcentagem de carbono, ou seja, baixa permeabilidade magnética, enquanto a linha verde representa o núcleo com maior permeabilidade magnética</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.5 –Comparação entre as sondas simuladas. Em azul: a sonda sem aprimoramento. Em verde: aumento da permeabilidade do intraferro. Em vermelho: aumento da permeabilidade do intraferro e acréscimo na densidade de corrente da bobina.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.6 – Resultado de inspeção com as sondas comerciais</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.7 – Resultado de inspeção com a sonda desenvolvida por Rebello [3] e com a sonda desenvolvida a partir das simulações</i>	<i>68</i>

<i>Figura 5.8 –Inspeção das amostras um e dois, com 0 e 8,3% de fase sigma precipitada, respectivamente. Varredura das amostras muito vezes se sobrepondo, dificultando assim a identificação da amostra com fase sigma precipitada</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.9 –As duas frequências que apresentaram o melhor resultado. Em destaque a área envolvendo os pontos mais distantes de uma mesma varredura comprovando a dificuldade de distinguir os resultados de inspeção com a sonda Five Legs</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.10 – Desenho do sensor TRod1</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.11 – Comparação entre os sinais de varredura da amostra solubilizada e da com 8,3% de fase sigma precipitada. Em destaque a pequena variação de ambos os sinais com o sensor TRod1</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.12 – Resultado de inspeção das amostras com fase sigma precipitada, sonda TRod1</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.13 – Desenho do sensor TRod2</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.14 – Resultado de caracterização do aço inoxidável duplex perante a precipitação de fase sigma com a sonda TRod2</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.15 – Comparação entre a variação de fase obtida com o TRod1 e TRod2. A sonda TRod2 apresenta uma maior variação de fase em relação a TRod1</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.16 – Inspeção de todas as amostras fabricadas com o sensor TRod2. Em destaque as amostras com fase sigma (elipse vermelha) e as amostras com desbalanceamento microestrutural (elipse preta)</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.17 - Foto da amostra #04, com 80% de ferrita e 20% de austenita. Empenamento devido ao tratamento térmico</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.18 – Foto do sensor TRod2 durante a varredura.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.19 – Desenho da sonda Double ‘C’ Core</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.20 – Resultado de caracterização do aço inoxidável duplex perante a precipitação de fase sigma com a sonda Double ‘C’ Core.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.21 – Simulação da sonda TRod2. Resultado das correntes induzidas geradas no aço inoxidável duplex.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.22 – Simulação da sonda Double ‘C’ Core. Resultado das correntes induzidas geradas no aço inoxidável duplex</i>	<i>83</i>

<i>Figura 5.23 – Sensores com cada uma das regiões que serão analisadas. A) Circuito magnético fechado. B) Circuito magnético aberto.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5.24 – Perfil de densidade de corrente induzida gerado pelo circuito magnético fechado (Double ‘C’ Core). Em destaque é possível visualizar o valor da densidade de corrente induzida para uma distância (profundidade) de 1,5 mm</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.25 –Perfil de densidade de corrente induzida gerado pelo circuito magnético aberto (TRod2). Em destaque é possível visualizar o valor da densidade de corrente induzida para uma distância (profundidade) de 1,5 mm</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.26 – Comparação entre a excursão dos fluxos magnéticos de cada um dos sensores</i>	<i>86</i>
<i>Figura 5.27 – Foto de uma junta soldada do aço inoxidável duplex. Em destaque uma das ZTAs com aproximadamente dois milímetros de largura</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5.28 – Sonda TRod2 com as dimensões fixas e as que irão variar durante o processo de otimização. As dimensões que estão cotadas serão fixas</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5.29 – Malha de elementos finitos gerada em uma das geometrias simuladas ...</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5.30 –Correntes induzidas de dois modelos analisados. A) diâmetro da sonda = 3 mm; Altura das bobinas de excitação= 1 mm; Comprimento da sonda= 20 mm. B) diâmetro da sonda = 5 mm; Altura das bobinas de excitação= 4 mm; Comprimento da sonda= 20 mm.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5.31 – Seção transversal da bobina de recepção. Sendo: b, a altura da bobina, R_1 o raio interno e R_2 o raio externo.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5.32 – Rotina implementada em Matlab para a determinação da voltagem nas bobinas de recepção. As setas em azul indicam a equivalência do código na equação 10</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5.33 – Diferentes geometrias analisadas da sonda para o raio de 5mm.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.34 – Relação entre a diferença de voltagem das bobinas receptoras e as geometrias dos sensores de correntes parasitas. À esquerda, sondas com 3 mm de diâmetro e, à direita, com 5 mm.....</i>	<i>96</i>

<i>Figura 5.35 – Comparação das linhas de fluxo magnético gerada por cada uma das geometrias. A) Bobinas de excitação pequenas resultando em uma interferência menor. B) Bobinas de excitação grandes resultando em uma maior interferência.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5.36 – Desenho com o dimensional da sonda STRod2.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 5.37 – Fotos do sensor TRod2. Onde o número 1 representa a sonda, o 2 a amostra de referência e o 3 a amostra inspecionada. A: foto da sonda com a proteção de acrílico. B: sonda com a amostra de referência. C: sonda durante a varredura da amostra com 8,3% de fase sigma</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5.38 – A: Vista frontal e superior do núcleo ferrítico utilizado para a construção da sonda Double ‘C’ Core – Catálogo FerroxCube [44]. B: Dimensões da sonda com a bobina de excitação e as de recepção</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5.39 - Fotos da sonda Double ‘C’ Core já construída</i>	<i>101</i>
<i>Figura 5.40 – Resultado de inspeção da sonda STRod2.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.41 – Resultado de inspeção da sonda Double ‘C’ Core.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.42 – Resultados da sonda STRod2 com uma separação entre as amostras com a fase deletéria precipitada e as demais</i>	<i>104</i>
<i>Figura 5.43 – Foto das faces da amostra #10</i>	<i>104</i>
<i>Figura 5.44 – Plano de impedância complexo indicando a variação entre do resultado de acordo com a condição da superfície</i>	<i>105</i>
<i>Figura 5.45 – Junta soldada com o percurso de varredura da sonda</i>	<i>106</i>
<i>Figura 5.46 – Amplitude e fase dos sinais da varredura. Em destaque as ZTAs.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 5.47 – Gradiente da amplitude dos sinais.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 5.48 – Superfície gerada com a variação da fase do sinal aqusitado</i>	<i>108</i>
<i>Figura 5.49 – Amplitude e fase dos sinais da varredura. Em destaque as ZTAs.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 5.50 – Gradiente da amplitude dos sinais.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5.51 – Vistas da configuração da sonda proposta para inspeção de ZTAs de juntas soldadas do aço inoxidável duplex. A: Vista isométrica. B: Vista frontal.</i>	<i>110</i>
<i>Figura 7.1 – Comparação entre os resultados de inspeção com as sondas TRod1, Trod2 e Double ‘C’ Core.....</i>	<i>115</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.1 – Amostras com diferentes tratamentos térmicos resultando em quantidades desiguais de fase sigma [3].....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 4.1 – Composição química do aço inoxidável duplex utilizado</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 4.2 – Tratamentos térmicos realizados e as porcentagens de cada fase presente na microestrutura do aço inoxidável duplex</i>	<i>46</i>

Capítulo 1 – Introdução

A partir do momento que foi reconhecida a capacidade de falha dos equipamentos que o homem constrói, foi necessária a criação de técnicas que permitissem avaliar os problemas de forma preventiva. Com essa finalidade foram desenvolvidas diversas técnicas de ensaios não destrutivos (END). Hoje, essas técnicas constituem uma das principais ferramentas no controle da integridade de materiais e produtos. As técnicas de END são baseadas nos mais variados princípios físicos. Algumas dessas técnicas são: acústicas (ultrassom, emissão acústica), eletromagnéticas (correntes parasitas, EMAT – *Electromagnetic Acoustic Transducer*), magnéticas (partículas magnéticas, campo de fuga), mecânicas (análise de vibrações, análise de deformações), radiográficas (raios-X, raios gamma), térmicas (termografia), e até mesmo técnicas de inspeção visual. Embora a quantidade de técnicas seja grande, as vezes só é necessário aplicar uma delas para obter a informação desejada. Tais técnicas de END são amplamente utilizadas nos setores de petróleo/petroquímico, aeronáutico, siderúrgico, naval, entre outros.

Estando o setor petrolífero brasileiro em uma fase de grandes mudanças, onde novas descobertas estão ocorrendo juntamente com novas dúvidas e incertezas, as técnicas de END vem ganhando cada vez mais espaço e importância. Devido à dificuldade e custo da implantação de um empreendimento *offshore* e os diversos riscos envolvidos, é de suma importância a garantia da integridade dos seus equipamentos, tanto durante a instalação, quanto durante a sua vida útil, e é neste escopo que o trabalho em questão se encaixa.

Este trabalho propõe-se a avaliar a integridade do aço inoxidável duplex com o uso da técnica de inspeção por correntes parasitas.

Os aços inoxidáveis duplex vêm sendo comumente utilizados em empreendimentos *offshore*, sendo bastante utilizados em estruturas, dutos e outros equipamentos submarinos, devido as suas excelentes propriedades mecânicas e de resistência à corrosão [1]. Apesar destas qualidades, os aços inoxidáveis duplex exibem uma certa instabilidade microestrutural que os torna suscetíveis ao aparecimento de fases deletérias em algumas faixas de temperatura. E na ocorrência, mesmo em baixos valores de fração volumétrica, prejudica consideravelmente as suas principais propriedades [2].

Além da precipitação de fases deletérias, os aços duplex podem ainda apresentar um problema de desbalanceamento na sua microestrutura, o qual ocorre geralmente durante o processo de fabricação do aço, fazendo com que a sua matriz de ferrita e austenita fique com uma considerável diferença em termos de fração volumétrica.

A partir da análise de trabalhos [3-5] que abordam a caracterização destas fases deletérias nestes aços, foi observado uma grande preocupação com a sua identificação e quantificação destas fases, o que já era esperado, devido à acentuada degradação do material relacionado a sua presença e os elevados riscos ligado às falhas dos equipamentos fabricados com este material. Entretanto, apesar da grande relevância dos resultados dos trabalhos analisados [3-5], notou-se a falta de um desenvolvimento de uma sonda de correntes parasitas específica para a caracterização da presença destas fases deletérias no aço inoxidável duplex.

Este trabalho propõe-se a desenvolver sondas de correntes parasitas capazes de identificar e quantificar a presença de fases deletérias nos aços inoxidáveis duplex. Para tal desenvolvimento serão realizadas simulações de sondas com o auxílio do software comercial COMSOL Multiphysics e a partir dos resultados das simulações pretende-se construir e avaliar o desempenho das sondas desenvolvidas quanto à caracterização do aço.

Inicialmente serão apresentados alguns conceitos teóricos dos aços inoxidáveis duplex, do princípio de inspeção por correntes parasitas e do desenvolvimento de sondas a partir de simulações. Em seguida, a literatura especializada na caracterização do aço duplex será analisada com o objetivo de apresentar os diversos desenvolvimentos já realizados e as possíveis lacunas que ainda podem ser preenchidas nesta área. Posteriormente, serão apresentados: a pesquisa desenvolvida e os resultados obtidos.

Capítulo 2 – Revisão teórica.

Este capítulo abordará um resumo da teoria dos aços inoxidáveis duplex e do ensaio de correntes parasitas necessária à compreensão dos tópicos que serão discutidos nos capítulos seguintes.

2.1 – Aços inoxidáveis duplex

2.1.1 – Aspectos gerais

Os aços inoxidáveis duplex fazem parte de uma classe de materiais com microestrutura bifásica, composta por uma matriz ferrítica (δ) e ilhas de austenita (γ), figura 2.1, com frações volumétricas aproximadamente iguais entre estas duas fases [1-3]. Esta classe de materiais é baseada no sistema Fe-Cr-Ni e o seu campo de formação está situado no interior do laço que separa as fases 100% austenita e 100% ferrita, figura 2.1. Esta liga é caracterizada por apresentar uma combinação atraente de propriedades mecânicas e de resistência à corrosão e, devido a estas características, este aço vem sendo amplamente utilizado na indústria de Petróleo & Gás, com aplicações desde a elevação e escoamento do fluido (poços, *risers*, componentes de bombas centrífugas submersas (BCS), ...) até à etapa de seu refino (equipamentos de refinarias) [6].

Modificações contínuas têm sido feitas para melhorar as propriedades de resistência à corrosão, usinabilidade e soldabilidade. Em particular, as adições de nitrogênio têm sido efetivas na melhoria da resistência à corrosão por pites e da soldabilidade [9]. As principais características do aço duplex podem sofrer algumas pequenas variações de uma liga para outra, de acordo com as aplicações do aço. Estas variações estão relacionadas com a quantidade dos elementos que compõem cada liga, ou seja, um aço duplex com uma alta porcentagem de cromo pode apresentar uma excelente resistência à corrosão, no entanto, pode não ser a liga ideal para ser conformada, como é o caso da família Fe-27Cr-6.5Ni-5Mo-0.4N [9].

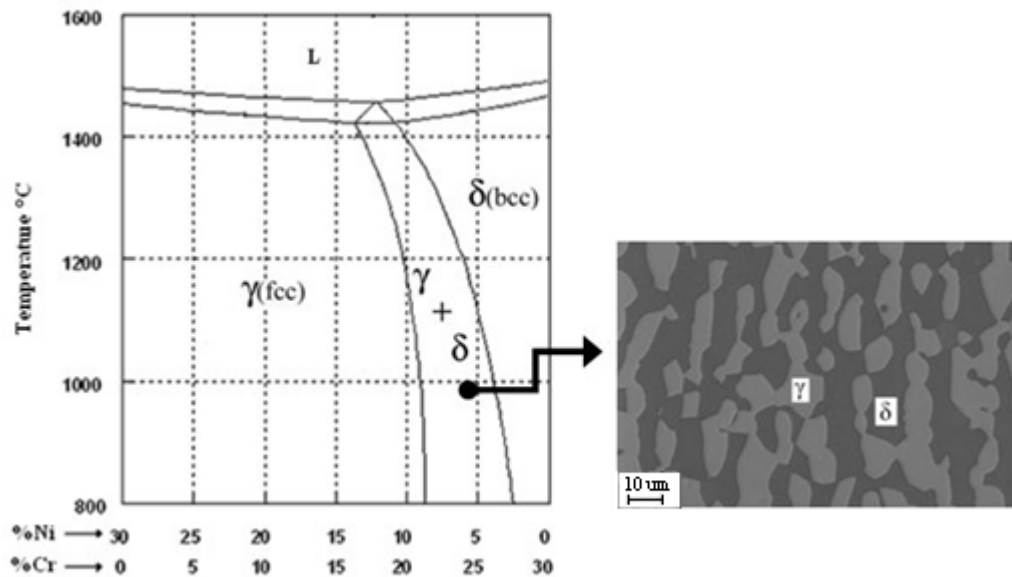


Figura 2.1: Diagrama de fase do aço duplex [10]. Em destaque a microestrutura bifásica característica deste tipo de aço [3]. Imagem metalográfica obtida com microscópio ótico e ataque com NaOH 20%.

O que diferencia os aços inoxidáveis duplex dos inoxidáveis ferríticos e austeníticos resistentes à corrosão é a sua excelente combinação entre as elevadas propriedades mecânicas e excelente resistência à corrosão. Tais características se devem à presença de ambas as fases (ferrita e austenita) na microestrutura da liga. Algumas vantagens específicas dos aços inoxidáveis duplex em relação à série AISI 300 convencional dos aços inoxidáveis são o maior valor de limite de escoamento (aproximadamente o dobro), maior resistência ao trincamento de corrosão sob tensão por cloretos e a maior resistência a corrosão por pites [11]. É importante ressaltar que estas características do aço duplex estão relacionadas com a presença de certos elementos de liga presentes no aço, e, à medida que varia a sua quantidade, ocorre uma variação nas propriedades do aço inoxidável duplex. Um exemplo, é o acréscimo do teor de nitrogênio na liga, fazendo com que a resistência mecânica aumente consideravelmente e a ductilidade diminua em proporções parecidas [9].

Tratando-se de corrosão, estes aços foram desenvolvidos principalmente para melhor resistir à corrosão sob tensão em ambientes ácidos [9]. Sob este tipo de corrosão, os inoxidáveis duplex possuem uma resistência superior aos aços austeníticos. Esta

superioridade se deve à presença da fase ferrítica, a qual interage mecanicamente e eletroquimicamente com a fase austenítica diminuindo a susceptibilidade a este tipo de corrosão. Assim como nas propriedades mecânicas, o nitrogênio possui um efeito bastante relevante na resistência à corrosão [10], pois quando possui uma maior quantidade deste elemento na liga, há uma melhor resistência à corrosão por pites. No entanto, é preciso ser cauteloso na adição deste elemento na liga devido ao seu efeito sobre a tenacidade.

Em resumo, para que os aços duplex obtenham sempre o melhor desempenho é de suma importância que a sua microestrutura esteja sempre balanceada e sem fases deletérias, pois esses materiais apresentam propriedades que derivam tanto da fase ferrítica, quanto da fase austenítica [9,10]. Os aços inoxidáveis austeníticos possuem excelentes soldabilidade e tenacidade em baixas temperaturas, entretanto, a sua resistência a corrosão sob tensão por cloretos é relativamente baixa, assim como a sua resistência mecânica. Já os aços inoxidáveis ferríticos possuem alta resistência à corrosão sob tensão por cloretos, porém baixa tenacidade [12]. A microestrutura duplex desbalanceada com uma maior quantidade de fase ferrítica apresentará então uma baixa tenacidade, enquanto que uma maior quantidade de fase austenítica acarretará em uma menor resistência associada à corrosão sob tensão por cloretos [9, 12]. Portanto, o desempenho dos aços duplex pode ser seriamente afetado pela soldagem, pois se houver mudança no balanço microestrutural (figura 2.2) durante o ciclo térmico de soldagem, as perdas das propriedades do aço duplex podem ser significativas. Por conta disso, os parâmetros de soldagem e os metais de adição empregados no processo devem ser cuidadosamente especificados e controlados [9].

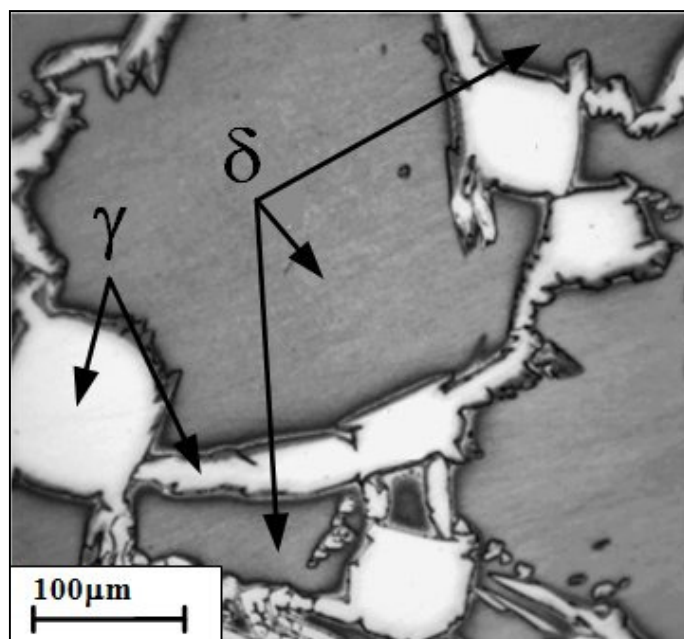


Figura 2.2: Microestrutura do duplex desbalanceada com 80% de ferrita (δ) e 20% de austenita (γ). Imagem obtida com microscopia ótica, material atacado com NaOH 20%.

Durante a soldagem ou qualquer outro processo que exponha o aço a um ciclo térmico elevado, além do problema do desbalanceamento das fases, pode ocorrer ainda a precipitação de fases deletérias devido a elevada quantidade de elementos de liga presentes nestes aços. Tais fases comprometem severamente as propriedades do material [10].

É sobre a identificação e quantificação de microestruturas desbalanceadas e fases deletérias precipitadas nos aços inoxidáveis duplex que o trabalho em questão se localiza.

2.1.2 – Precipitações de fases nos aços inoxidáveis duplex

A quantidade de elementos de liga e a presença de uma matriz ferrítica nos aços duplex acarretam em uma elevada propensão a formação de fases deletérias [9,10]. Tais fases se formam em uma faixa de temperaturas de 300°C a 1000°C [3, 9, 10]. A exposição destas ligas nesta faixa de temperatura pode ocorrer devido a variações térmicas durante

as operações de soldagem, tratamentos térmicos mal executados e exposição em condições de serviço. Para evitar a formação de fases deletérias, é recomendado que a temperatura de aplicação dos aços inoxidáveis duplex não ultrapasse 250°C [9, 12].

Como pode ser visto pelo diagrama de resfriamento contínuo esquemático de um aço da série duplex (figura 2.3), diversas fases deletérias podem precipitar durante o aquecimento da liga até 1000°C. No entanto, a precipitação da fase sigma (σ) é a mais relevante para os aços duplex, pois em relação às demais fases esta é a que apresenta uma fração volumétrica consideravelmente mais elevada [3].

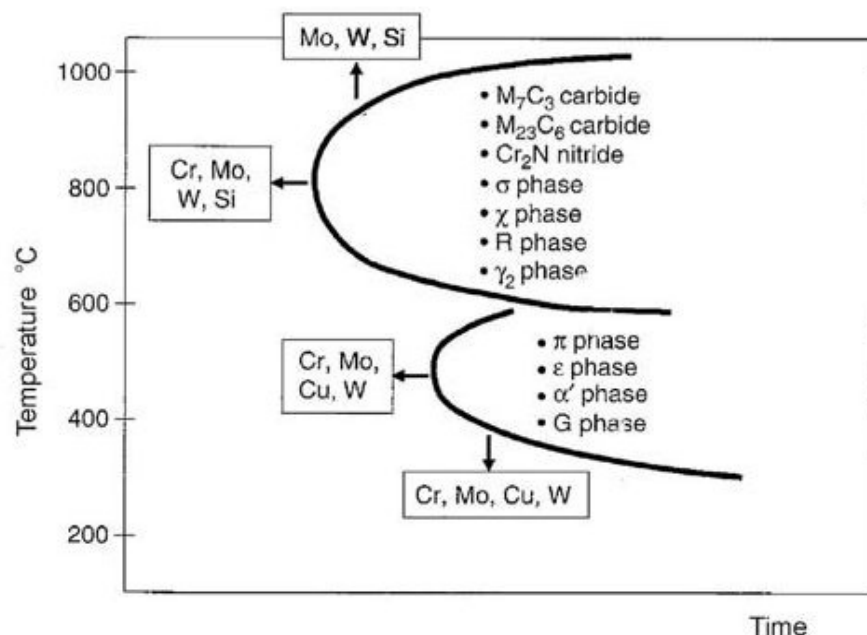


Figura 2.3: Diagrama tempo-temperatura-transformação (TTT) para os aços inoxidáveis duplex apontando as diferentes fases que podem precipitar [9].

2.1.3 – Fase sigma (σ)

A fase sigma é um composto de Fe-Cr que se forma em altas temperaturas em aços ferríticos, ou em regiões ferríticas de ligas austeníticas, ou até mesmo em ligas austeníticas. Esta fase apresenta elevada dureza e grande fragilidade [10, 13].

Como visto pela figura 2.3, a fase intermetálica σ em aços inoxidáveis duplex se precipita preferencialmente em temperaturas entre 600°C e 950°C e o mecanismo de precipitação é uma reação de transformação eutetóide da ferrita em fase sigma mais austenita secundária ($\delta \rightarrow \sigma + \gamma^*$), já que a ferrita é uma fase metaestável na faixa de temperatura onde ocorre a transformação da fase sigma [10]. Ou seja, a precipitação da fase sigma é acompanhada pela formação de uma nova fase austenítica, muitas vezes chamada de austenita secundária (γ^*). Logo que a fase sigma se forma, o cromo e o molibdênio fazem parte desta fase intermetálica que acaba sendo enriquecida com esses elementos. Simultaneamente o Ni acaba por difundir dentro da fase ferrítica. O enriquecimento de elementos austenitizantes (Ni) na ferrita e a concentração de elementos ferritizantes (Cr e Mo) onde a fase sigma é formada acarretam na desestabilização da ferrita que acaba se transformando em austenita secundária [9, 10]. A decomposição da ferrita em fase sigma e austenita secundária é a principal reação para a precipitação de fases deletérias, e tal transformação pode ocorrer em uma larga faixa de temperatura. Entretanto, além da fase sigma, uma pequena porcentagem da fase deletéria chi (χ) pode também precipitar-se em regiões enriquecidas de molibdênio a partir da reação $\delta \rightarrow \chi$, nas temperaturas entre 700 e 900°C [10, 14, 15]. De acordo com os autores Michalska e Sozanska [16] a fase chi é metaestável, dando origem a fase sigma à medida que o material é envelhecido [15]. Contudo, a formação da fase sigma pode ser dada a partir das seguintes reações: $\delta \rightarrow \sigma + \gamma^*$, $\delta \rightarrow \sigma$ ou $\delta \rightarrow \chi \rightarrow \sigma$.

Com o aumento alcançado com um microscópio eletrônico de transmissão (MET) apresentado pela figura 2.4, é possível visualizar os grãos ferríticos e austeníticos, assim como as fases sigma e a austenita secundária precipitadas na interface das fases originais do aço. A figura 2.5, obtida com um microscópio ótico, por não apresentar um aumento de resolução tão grande, só é possível visualizar as fases originais do aço e a fase sigma precipitada nos contornos da ferrita.

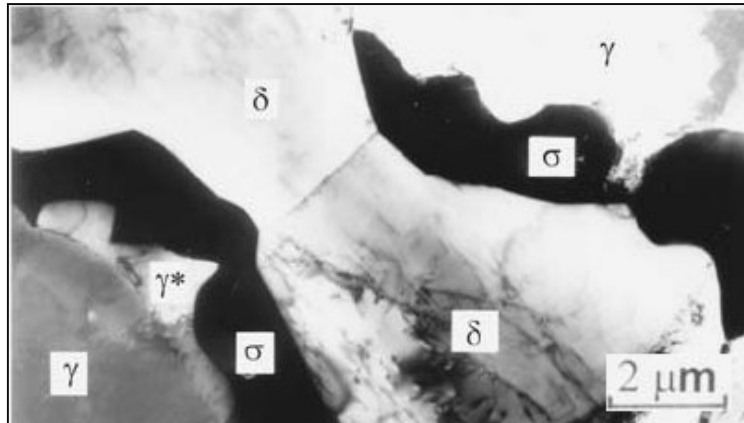


Figura 2.4: Microestrutura do aço inoxidável duplex envelhecida - Presença da fase sigma e da austenita secundária [17]. Imagem obtida com um microscópio eletrônico de transmissão (MET).

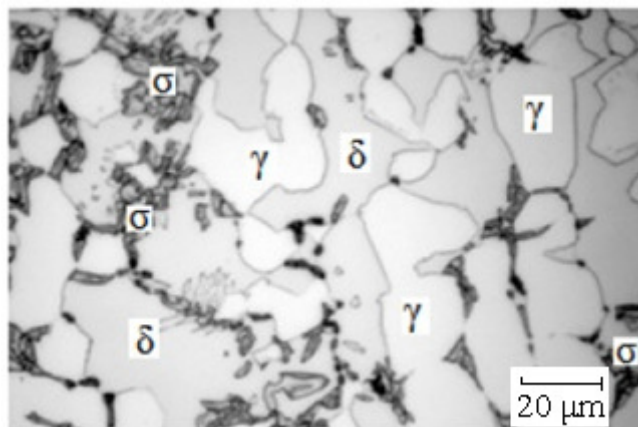


Figura 2.5: Microestrutura do aço inoxidável duplex envelhecida com aproximadamente 8% de fase sigma precipitada. Imagem obtida com um microscópio ótico. Ataque realizado com NaOH 20%.

Para se ter uma idéia da gravidade do aparecimento desta fase deletéria, a formação de apenas 0,52% de fase sigma é suficiente para provocar um considerável decréscimo na resistência a corrosão [18]. Com relação às propriedades mecânicas, com baixíssimos percentuais de fase sigma precipitada a energia de impacto Charpy cai drasticamente. Maehara [19] publicou um gráfico, figura 2.6, que ilustra bem esta queda abrupta da energia de impacto em função da fração volumétrica de fase sigma.

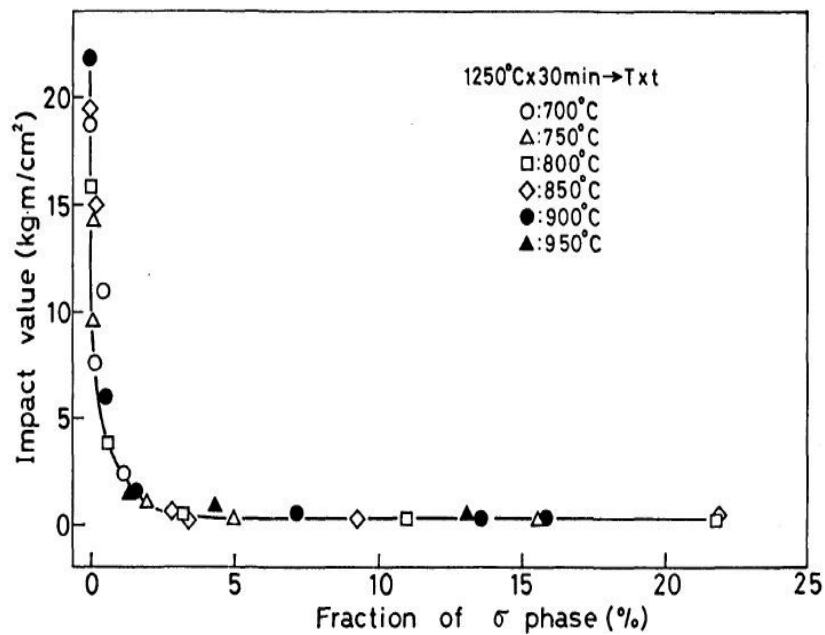


Figura 2.6: Energia de impacto do aço inoxidável duplex 2205 em função da porcentagem de fase sigma precipitada [19].

O aparecimento desta fase causa também uma mudança nas propriedades eletromagnéticas do aço duplex, pois a fase ferrítica é ferromagnética, enquanto a austenita, austenita secundária, chi e sigma são não-magnéticas [3, 15]. Como a difusão de elementos formadores de sigma (sigmagênios), principalmente o cromo, é cerca de 100 vezes mais rápida na ferrita que na austenita [20], um aumento na porcentagem da fase sigma acarreta em uma diminuição da ferrita, fazendo com que o material fique menos magnético [3, 20]. Por conta destas características eletromagnéticas, a utilização do ensaio por correntes parasitas se mostra uma técnica não destrutiva aplicável à detecção de fase sigma nos aços inoxidáveis duplex [3].

2.2 – Correntes parasitas

2.2.1 – Princípios da inspeção por correntes parasitas

A inspeção por correntes parasitas, conhecida também por corrente de Foucault ou do inglês *eddy currents*, é uma técnica de inspeção não-destrutiva baseada na introdução de uma corrente elétrica alternada no material a inspecionar e observação da interação entre o campo magnético gerado pela sonda e o induzido no material inspecionado.

O princípio básico do funcionamento das correntes parasitas é similar ao de um transformador, onde a bobina da sonda corresponde ao componente primário e o material inspecionado ao componente secundário do transformador. De acordo com a lei de Maxwell-Ampère, quando uma bobina é excitada com uma corrente alternada, um campo magnético alternado primário, H_p , é gerado. Ao aproximar esta bobina de uma superfície de um material condutor elétrico, o campo gerado pela bobina penetra no material, e então, correntes parasitas são induzidas na amostra. Estas correntes geradas no material inspecionado dão origem a um novo campo magnético, conhecido como campo secundário, H_s , que se opõe às variações do campo primário gerado na bobina. Portanto, a impedância da bobina será afetada pelo comportamento das correntes parasitas, como resultado da redução do fluxo de campo magnético resultante na bobina [21]. A figura 2.7 ilustra passo a passo o princípio de um sensor de correntes parasitas, onde, da esquerda para direita, a bobina é excitada com uma corrente elétrica alternada, um campo magnético é gerado, correntes parasitas são induzidas no material inspecionado e, finalmente, esta corrente gera um campo secundário que interage com o campo primário e altera a impedância da bobina.

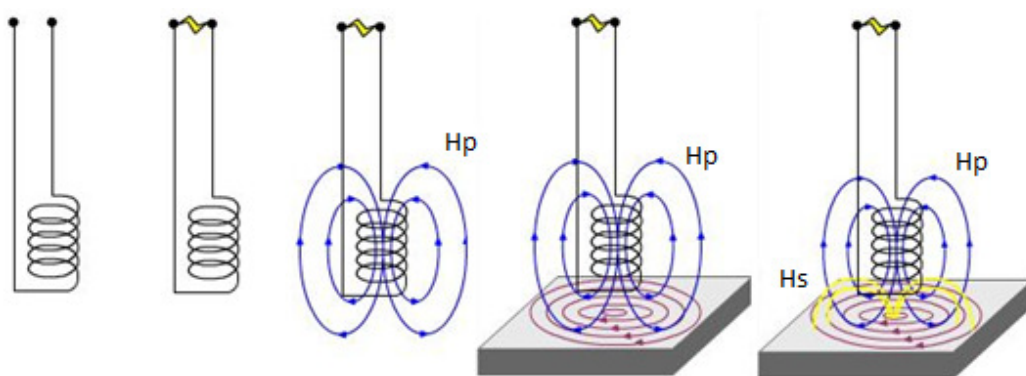


Figura 2.7: Princípio da inspeção por correntes parasitas [22].

A inspeção por correntes parasitas é uma técnica de diversas aplicações, pois além da detecção de descontinuidades no material, a técnica possibilita ainda a medição de características mecânicas e metalúrgicas que sejam influenciadas por propriedades elétricas e/ou magnéticas dos materiais [21, 22]. Baseado na capacidade de medição das características mecânicas e metalúrgicas é que o ensaio de correntes parasitas foi escolhido para a detecção de fase sigma e de microestruturas desbalanceadas no aço inoxidável duplex.

2.2.2 – Profundidade de penetração padrão (δ) e lift-off

Uma das grandes vantagens da técnica de correntes parasitas sobre outros métodos não destrutivos é que não necessita de um contato físico entre a bobina e a peça, pois é baseada no princípio de indução eletromagnética. Entretanto, uma limitação do método em relação a outros convencionais, como por exemplo, o ultrassom, é a capacidade de penetração no material inspecionado. Em materiais espessos e/ou com alta permeabilidade magnética (ex.: ferro), a limitação de penetração da técnica de correntes parasitas implica na inspeção somente das camadas superficiais.

Em ensaios por correntes parasitas, o campo magnético primário que penetra o material inspecionado decresce com a profundidade, fazendo com que a densidade de correntes parasitas decresça exponencialmente. Este fenômeno de decaimento é conhecido como efeito pelicular, ou do inglês, *skin depth* [21]. A profundidade na qual a intensidade de

corrente é reduzida a 36,8% ($1/e \cdot 100\%$) do seu valor superficial é definida como profundidade de penetração padrão [21], conhecida como δ . O valor de δ é dado por:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (1)$$

Onde:

f é a frequência [Hz];

μ é a permeabilidade magnética [Tm/A];

σ é a condutividade [S/m].

Pela figura 2.8, pode-se verificar a influência que a frequência, a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética possuem sobre a profundidade de penetração. Na imagem à esquerda da figura 2.8 é ilustrado as correntes parasitas geradas em um material que possui uma alta permeabilidade magnética e condutividade elétrica, além disso, é inspecionado com uma sonda com uma alta frequência de operação. O resultado é uma baixa profundidade de penetração das correntes parasitas. Já a imagem da direita a situação é o inverso, baixa permeabilidade magnética e condutividade elétrica do material, e baixa frequência de operação da sonda, resultando em uma grande profundidade de penetração das correntes parasitas. Apesar de uma baixa frequência de operação na sonda resultar em uma maior profundidade de penetração, nem sempre é possível trabalhar com frequências baixas, pois nesta situação a densidade de correntes parasitas na superfície do material é menor e consequentemente a sensibilidade da sonda. Muitas vezes para se obter uma maior sensibilidade da sonda é aumentada a frequência de operação, para que a densidade de correntes parasitas na superfície seja também maior. Outro fator é a permeabilidade magnética, como já foi dito acima. Materiais ferromagnéticos (níquel, ferro, aços ferríticos, etc) possuem alta permeabilidade magnética, levando as correntes parasitas induzidas neles apresentarem baixa penetração.

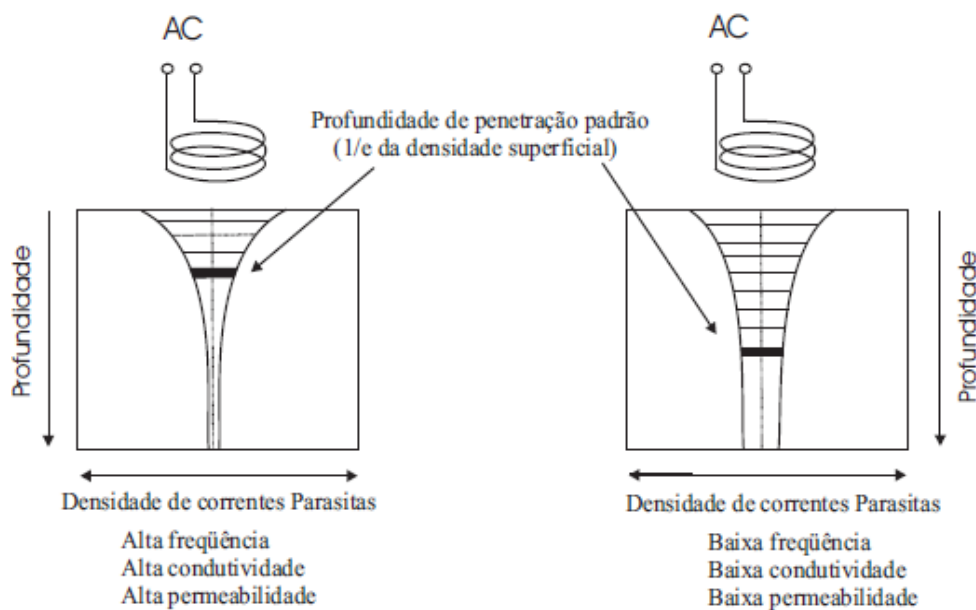


Figura 2.8: Profundidade de penetração (*skin depth*) [24].

Além da dificuldade de grandes penetrações no material inspecionado, o ensaio de correntes parasitas apresentada ainda outro fator determinante para as inspeções, o *lift-off*. Este termo é usado para descrever o espaçamento existente entre sonda e a peça inspecionada, figura 2.9. Uma aplicação clássica do *lift-off* em inspeções é para a avaliação de espessuras de camadas de revestimento não condutor, tais como tintas, camadas anodizadas ou camadas de óxidos, colocadas sobre metais condutores. Todavia, na grande maioria das vezes o *lift-off* é desfavorável para as inspeções, pois além de atenuar o sinal, o seu efeito pode mascarar defeitos pequenos, principalmente em regiões onde a superfície de inspeção é irregular.

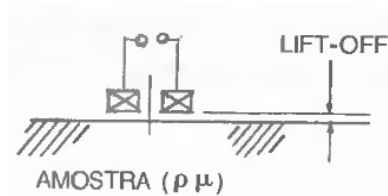


Figura 2.9: *Lift-off* - Distância entre a amostra e a sonda [21].

2.2.3 – Tipos de sondas de correntes parasitas

Uma grande vantagem do ensaio por correntes parasitas é poder desenvolver a sonda de acordo com a aplicação desejada. Existem diversos tipos de sondas de correntes parasitas que são classificadas de acordo com o modo de operação e a configuração da bobina. Os arranjos mais comuns são: absoluto, diferencial, reflexão, híbrida (diferencial + reflexão), entre outros. Abaixo serão descritos os principais arranjos utilizados em inspeções.

- Sondas absolutas

Geralmente estas sondas possuem uma única bobina que é alimentada com uma corrente alternada pra gerar as correntes parasitas. Tais sondas são amplamente utilizadas devido a sua versatilidade, podendo ser aplicadas para detecção de defeitos, caracterização de materiais, diagnóstico de espessura de revestimento. Quando se trata de caracterização de materiais, estas sondas são as mais recomendadas devido a sua grande sensibilidade à condutividade, permeabilidade e *lift-off* [22]. Este tipo de sonda geralmente apresenta um núcleo ferrítico, conhecido como entreferro, que ajuda a conduzir as linhas de fluxo magnético ao material inspecionado [22]. Comercialmente é comum encontrar alguns arranjos absolutos com uma sonda de referência para compensar as variações de temperatura do ambiente. A figura 2.10 apresenta o enrolamento típico de uma bobina que compõe uma sonda absoluta e a foto de algumas sondas com esta configuração.

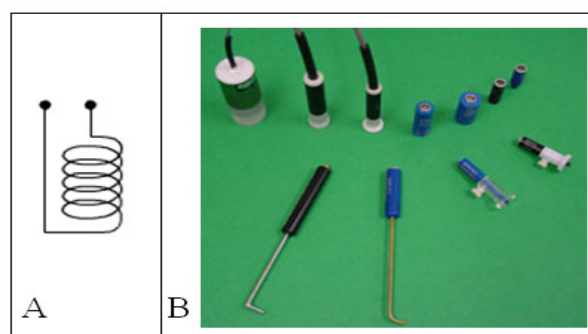


Figura 2.10: A: Enrolamento de uma sonda absoluta sem entreferro. B: Foto de algumas sondas absolutas [22].

- Sondas diferenciais

Constituídas por duas bobinas, as sondas diferenciais recebem este nome devido a resposta ser um sinal de diferença entre as bobinas que compõem a sonda. Estando as bobinas da sonda com a mesma quantidade de espiras, porém com a polaridade invertida, o campo gerado por ambas as bobinas é o mesmo em módulo, porém com sentido invertido. Por conta desta montagem, quando a sonda está localizada em uma região homogênea a sua resposta é “zero”, dado que uma bobina anula o efeito da outra. Ao se aproximar de uma região defeituosa a bobina que primeiro entrar em contato com o defeito terá uma impedância diferente da bobina que está na região homogênea e um sinal diferente “zero” será produzido. Este arranjo é muito utilizado para detecção de pequenos defeitos devido a sua grande sensibilidade [22]. Entretanto, quando se trata de defeitos muito grandes, onde o comprimento do defeito é maior que o espaçamento entre as bobinas, o sinal no interior do defeito será “zero”, já que ambas as bobinas estão com a mesma resposta do defeito. Desta forma, somente as bordas do defeito serão detectadas, gerando assim a falsa impressão de dois defeitos pequenos ao invés de um defeito grande. A figura 2.11 apresenta a sequência de uma sonda diferencial passando por um defeito. Inicialmente o ponto de trabalho está em zero, à medida que um dos enrolamentos se aproxima do defeito o ponto de trabalho se desloca, pois a diferença entre os sinais das bobinas é diferente de “zero”. Quando as duas bobinas estão sobre o defeito o ponto volta para zero pois a resposta de ambas as bobinas é novamente a mesma. Deslocando para a fora do defeito, o sinal de diferença agora é no sentido contrário, dado que a resposta do defeito é dada pela bobina com polaridade invertida. Finalmente ao retornar para uma região sem anomalia o ponto de trabalho volta para “zero”. Este sinal em formato de um “laço” ou de uma gravata borboleta é característico de sondas diferenciais e é conhecido como *lissajou*.

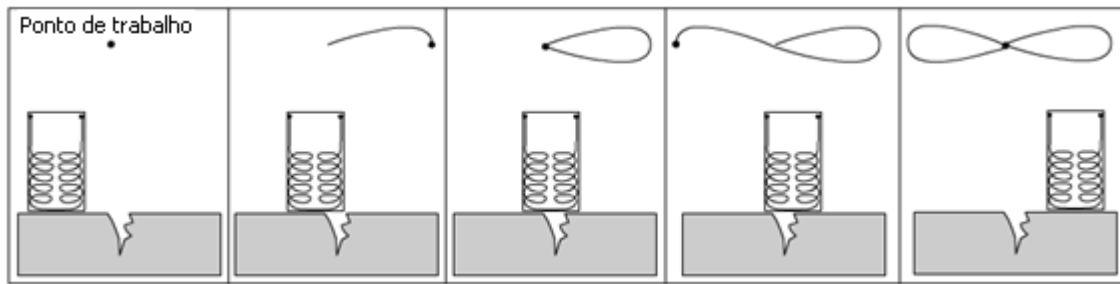


Figura 2.11: Sequência de uma inspeção com uma sonda diferencial [22].

- Sondas de reflexão

Assim como as diferenciais, esta configuração possui duas bobinas, porém, neste caso, cada uma com uma função distinta. Um enrolamento é utilizado somente para excitação das correntes parasitas no material, enquanto o outro fica responsável para avaliar as mudanças no material. Uma sonda com este tipo de arranjo é conhecida comercialmente como *driver/pick-up*. A figura 2.12 apresenta dois arranjos de sondas de reflexão, sendo o representado pela 2.12 A, o mais clássico, enquanto o da 2.12 B por apresentar duas bobinas de excitação, uma em cada face do material, é utilizado quando deseja-se detectar defeitos passantes.

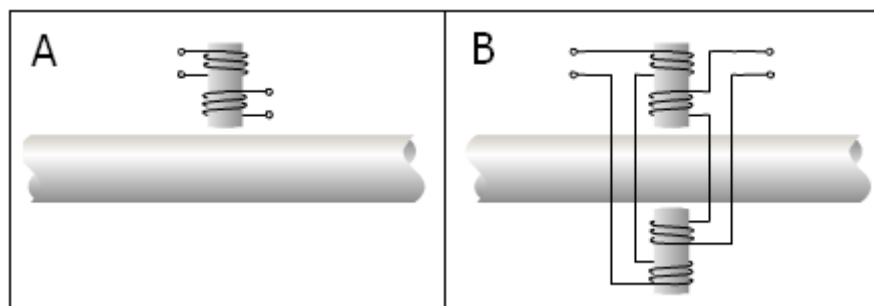


Figura 2.12: A: Arranjo clássico de uma sonda por reflexão, onde uma bobina atua para excitação e outra para recepção. B: Arranjo utilizado para inspecionar simultaneamente as duas faces de uma mesma amostra [22].

- Sondas híbridas

Como o próprio nome sugere, são as sondas que utilizam a combinação de dois ou mais arranjos de enrolamentos. Uma configuração híbrida bastante usual é a mistura de sondas diferenciais e de reflexão, onde, os enrolamentos para a detecção estão numa configuração diferencial e a bobina de excitação envolvendo-as. Vale ressaltar que as sondas híbridas são geralmente desenvolvidas para uma aplicação específica, e, o arranjo das bobinas e a configuração da sonda dependem exclusivamente do que se deseja inspecionar e da experiência/criatividade do pesquisador/inspetor.

2.2.4 – Plano de impedância

A impedância elétrica (Z) é a oposição total que um circuito oferece ao fluxo de uma corrente elétrica variável no tempo. A impedância é medida em ohms e é expressa como um número complexo, possuindo uma parte real, equivalente à resistência R , e uma parte imaginária, dada pela reatância capacitiva X_C e indutiva X_L . Em uma sonda de correntes parasitas, por geralmente ser formada por uma única bobina, a influência da reatância capacitiva é desprezível, restando somente a reatância indutiva para compor a parte complexa da impedância. O circuito apresentado pela figura 2.13 ‘A’ representa uma sonda de correntes parasitas, que, por ser formada por uma bobina apresenta uma resistência (R) e uma reatância indutiva (X_L). A impedância total do circuito é afetada por cada uma dessas componentes, e, como apresentado pela figura 2.13 ‘B’ e ‘C’ a amplitude da resistência (V_R) está em fase com a corrente, e a amplitude do indutor (V_L) está defasada de 90° . Para chegar ao valor total da tensão (V_T) soma-se vetorialmente as tensões V_R e V_L .

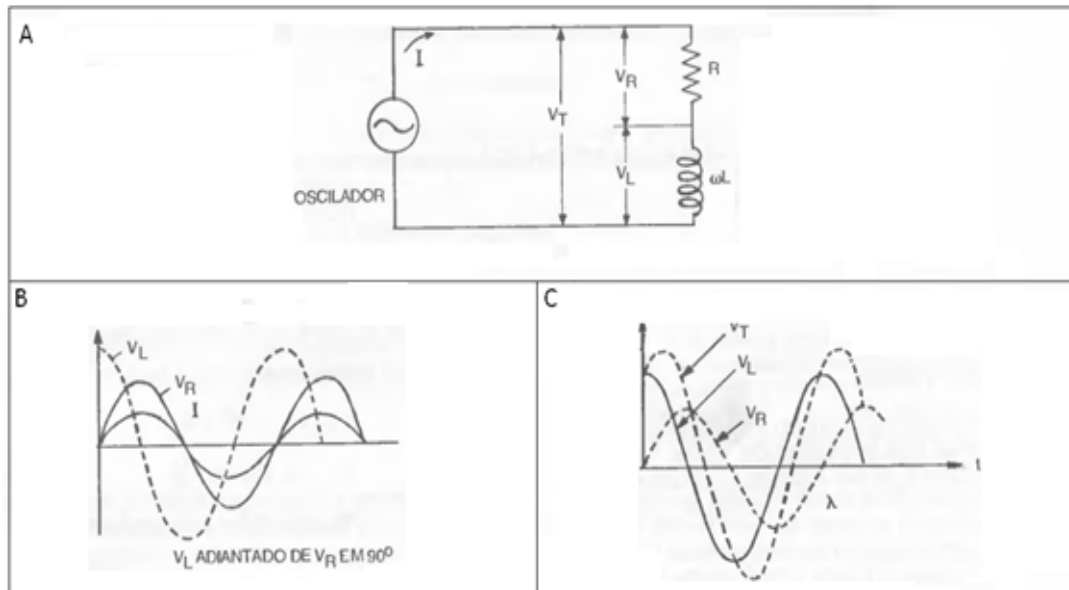


Figura 2.13: A: Circuito elétrico que representa uma sonda de correntes parasitas. B: V_R em fase com a corrente e V_L defasado de 90° . C: V_T é a soma de V_R e V_L [21].

A relação entre a impedância e os seus componentes (resistência e reatância indutiva) pode ser representada por um vetor (figura 2.14), onde, a amplitude da impedância em uma sonda de correntes parasitas é o módulo deste vetor e pode ser calculada a partir da equação 2.

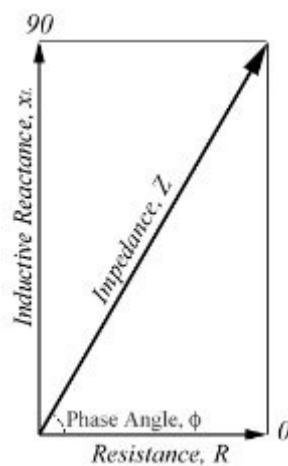


Figura 2.14: Plano de impedância [22].

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (2)$$

Onde:

$$X_L = 2.\pi.f.L \quad (3)$$

Sendo:

f : Frequência [Hz]

L : Indutância [Henrys]

A análise dos resultados de uma inspeção por correntes parasitas a partir do plano de impedância é a maneira mais usual e está presente na maioria dos equipamentos comerciais. O plano da figura 2.15 ilustra a variação da impedância de acordo com as propriedades do material.

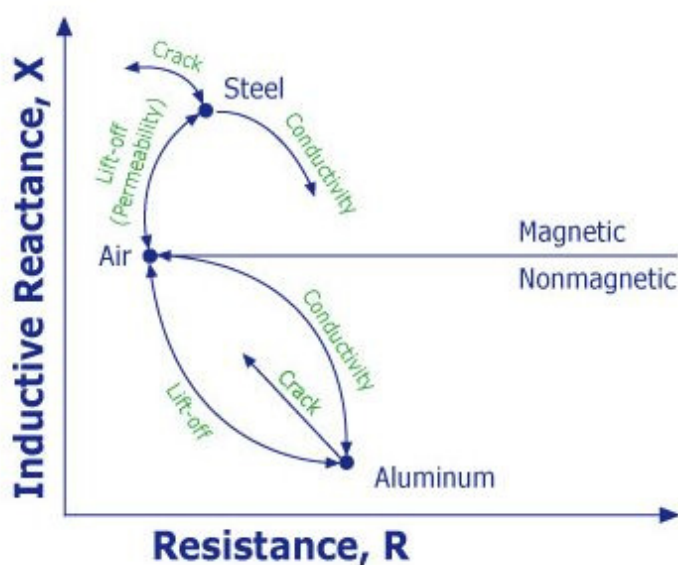


Figura 2.15: Variação da impedância a partir das variações das propriedades dos materiais [22].

Como pôde ser observado pela figura 2.15, partindo-se da sonda posicionada no ar, ao aproximar a sonda de correntes parasitas do alumínio, a componente resistiva aumenta,

pois correntes parasitas são geradas no alumínio drenando energia da bobina e fazendo com que haja um aumento na sua resistência. A reatância indutiva, entretanto, decresce devido ao campo magnético gerado pelas correntes parasitas se opor ao campo magnético da bobina, resultando em um campo magnético menor para produzir indutância. Quando a sonda é aproximada de um material magnético, como aço carbono comum, ocorre um comportamento diferente do que ocorre em materiais não magnéticos, como pôde ser visto pela figura 2.15. A componente resistiva, assim como no alumínio e nos demais materiais não magnéticos, apresenta um aumento à medida que a sonda se aproxima do aço. Porém, é possível notar um aumento na reatância indutiva. Esse acréscimo se deve à alta permeabilidade magnética do aço carbono, a qual concentra o campo magnético da bobina no aço. Essa concentração do campo da bobina no aço se sobrepõe ao campo magnético gerado pelas correntes parasitas, tornando-se o campo prevalente [22]. Esta grande sensibilidade das sondas de correntes parasitas aos materiais com diferentes permeabilidades magnéticas e condutividade elétrica é a base para empregar esta técnica para a caracterização de materiais.

2.3 – Simulação da técnica de inspeção por correntes parasitas a partir do método dos elementos finitos

A principal finalidade da simulação é executar um modelo que reproduza em todos os detalhes um sistema real de modo a estudar seu comportamento. Normalmente uma simulação refere-se a uma implementação computacional do modelo, o qual é rodado ao longo do tempo em diferentes condições para estudo das interações entre as partes constituintes de um sistema [23]. Ou seja, a partir de um modelo simulado que representa bem a realidade, é possível realizar diversas alterações no modelo, de maneira fácil e rápida, e verificar a influência das modificações, sem que haja a necessidade de sair do ambiente virtual, reduzindo-se assim a necessidade de experimentos longos. É com esse intuito de reproduzir o mundo real para estudá-lo melhor, que neste trabalho será utilizado técnicas de simulação em sondas de correntes parasitas, visando o seu aperfeiçoamento e consequentemente uma melhoria no resultado da inspeção dos aços inoxidáveis duplex.

Uma parte importante em qualquer simulador de correntes parasitas é o cálculo do vetor potencial magnético, pois a partir do seu valor é possível obter-se outras grandezas eletromagnéticas como: densidade de fluxo magnético, impedância da bobina, etc. O método de cálculo mais comum em simuladores de correntes parasitas é o método dos elementos finitos (MEF ou FEM em inglês). O método dos elementos finitos 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 [24]. 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 *grid*. 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 [25].

2.3.1 – Modelo matemático

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 $\vec{J}$ [24, 26]. As equações de Maxwell são mostradas a seguir:

- Lei de Gauss para o campo elétrico:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (4)$$

Onde: ρ é a densidade de carga elétrica.

- Lei de Gauss para o campo magnético:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

- Lei de Faraday:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

- Lei de Ampère:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \quad (7)$$

Em um meio linear e isotrópico, onde as propriedades físicas: permeabilidade magnética $[\mu]$, condutividade elétrica $[\sigma]$ e permissividade $[\epsilon]$, independem da direção considerada, podem-se assumir as seguintes relações [24, 26]: $B = \mu H$ e $D = \epsilon E$. A densidade de corrente é escrita como $J = \sigma E$.

O tratamento de problemas de correntes parasitas é baseado na solução de uma equação diferencial derivada das equações de Maxwell. A partir de algumas manipulações das equações de Maxwell, pode-se chegar à equação diferencial de difusão que governa o fenômeno de correntes parasitas em materiais condutores (eq. 8) [26, 27].

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \right) \times (\nabla \times \bar{A}) = \bar{J}_s - \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (8)$$

Onde:

μ : é a permeabilidade magnética [H/m].

$\bar{A}$: é o vetor de potencial magnético [Weber/m].

$\bar{J}_s$: é o vetor de densidade de corrente devido à uma fonte externa [A/m²].

σ : é a condutividade [ohms.m].

Para o caso linear, com alimentação a partir de uma onda contínua com uma única frequência (geralmente senoidal), como é o caso da maioria das sondas absolutas de correntes parasitas, a equação 8 pode ser reduzida para:

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \right) \times (\nabla \times \bar{A}) = -\bar{J}_s + j\omega\sigma\bar{A} \quad (9)$$

Onde:

ω : é a frequência angular [rad/s]

A solução desta equação linear de difusão para a condição de alimentação senoidal em regime permanente pode ser obtida em termos do $\bar{A}$, resolvendo a equação 9 com as devidas condições de contorno. A partir dos valores do $\bar{A}$, podem ser obtidos diversos fenômenos magnéticos, como: dissipação de energia, densidade de fluxo magnético, variação de impedância da bobina, etc [27].

A grande maioria das sondas de correntes parasitas são circulares e simétricas em relação ao eixo das ordenadas. Tal fato facilita muito a sua modelagem, pois as sondas podem ser analisadas em um sistema de coordenadas cilíndricas (r, θ, z) [26, 27] onde somente metade da sonda é contemplada no modelo. A vantagem de trabalhar com modelos com simetria de eixo é a rapidez com que o modelo é resolvido. A figura 2.16 apresenta a simulação em duas dimensões da mesma sonda de correntes parasitas, onde, na 2.16 'A' a modelagem foi feita com simetria de eixo (*axisymmetric*) e na 2.16 'B', não. Em ambos os resultados é possível visualizar as correntes induzidas geradas pela sonda.

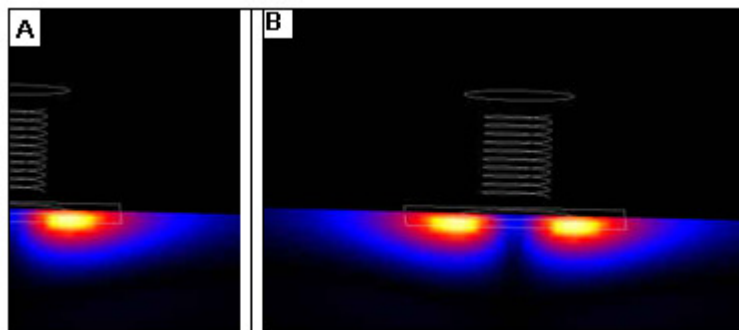


Figura 2.16: Resultado da simulação de sondas de correntes parasitas [22]. A: modelo com simetria de eixo. B: modelo sem simetria de eixo.

2.3.2 – Projetos de sondas de correntes parasitas a partir de softwares comerciais de simulação que utilizam o método dos elementos finitos

Com o intuito de simular a inspeção de um material a partir da técnica não destrutiva de correntes parasitas, será utilizado o software comercial COMSOL Multiphysics que apresenta um módulo eletromagnético.

O principal objetivo da simulação para este tipo de inspeção é conseguir analisar qualitativamente os 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...), para que a partir desta avaliação, seja possível definir parâmetros ótimos para a construção da sonda. A simulação a partir do software comercial COMSOL Multiphysics consiste em trabalhar em modelos com simetria axial, onde a variável é o vetor potencial magnético (A), que obedece a relação estabelecida pela equação 9. Abaixo serão mostrados os principais passos para se montar o problema a partir do COMSOL Multiphysics:

1º- Utiliza-se o módulo AC/DC, escolhendo trabalhar com correntes induzidas em duas dimensões (2D) com simetria axial.

2º- Montar o esquema: Definir a região limite, desenhar a bobina e o núcleo. Cada uma dessas regiões é chamada de subdomínio. O eixo horizontal representa o eixo r , e o vertical o eixo z no plano rz em coordenadas cilíndricas (figura 2.17).

3º- Especificar as propriedades magnéticas e elétricas de cada subdomínio, assim como a densidade de corrente externa do subdomínio que representa a bobina.

4º- Definir as condições de contorno do problema.

5º- Definir a(s) frequência(s) na qual o problema será analisado.

6º- Criar a malha de elementos finitos refinando-a principalmente nas regiões próximas à sonda (figura 2.18).

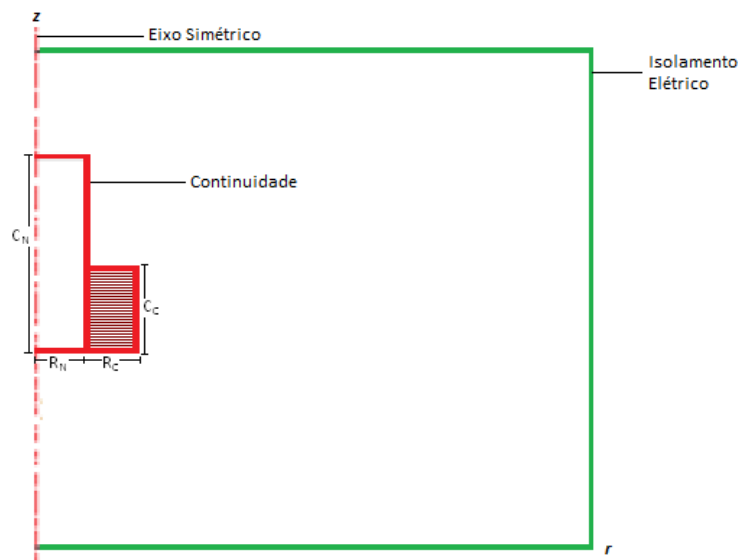


Figura 2.17: Projeto da sonda em COMSOL Multiphysics.

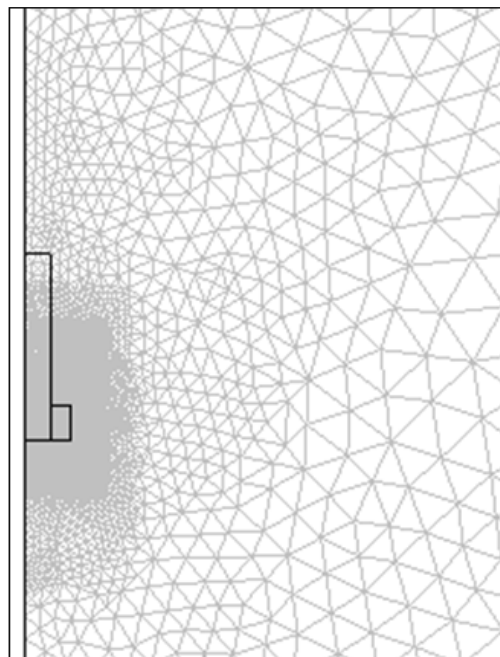


Figura 2.18: Criação da malha.

Capítulo 3 – Revisão bibliográfica.

3.1 – Aplicações atuais da técnica de inspeção por correntes parasitas

O método de ensaio por correntes parasitas é extremamente versátil visto que pode ser aplicado em qualquer objeto que possua variações geométricas, elétricas ou magnéticas. Fazendo-se a devida adaptação a cada necessidade, sobretudo quanto ao tipo e tamanho de sonda, o ensaio pode ser realizado para:

- Detectar falta de homogeneidade no material tais como trincas, deformações, inclusões, variações de espessura, corrosão, etc.;
- Medir espessura ou variação de espessura de camada não condutora aplicada em material condutor ou camada condutora aplicada em material de condutividade diferente;
- Detectar variações associadas à condutividade do material, falta de homogeneidade em ligas, superaquecimento local, erros de tratamento térmico, etc.;
- Detectar variações associadas à permeabilidade magnética através de medição das intensidades dos campos magnéticos.

Atualmente, a técnica de inspeção não destrutiva por correntes parasitas é largamente utilizada nas indústrias aeronáutica, petróleo&gás, petroquímica e nuclear. A figura 3.1 ilustra algumas das aplicações clássicas do ensaio por correntes parasitas.

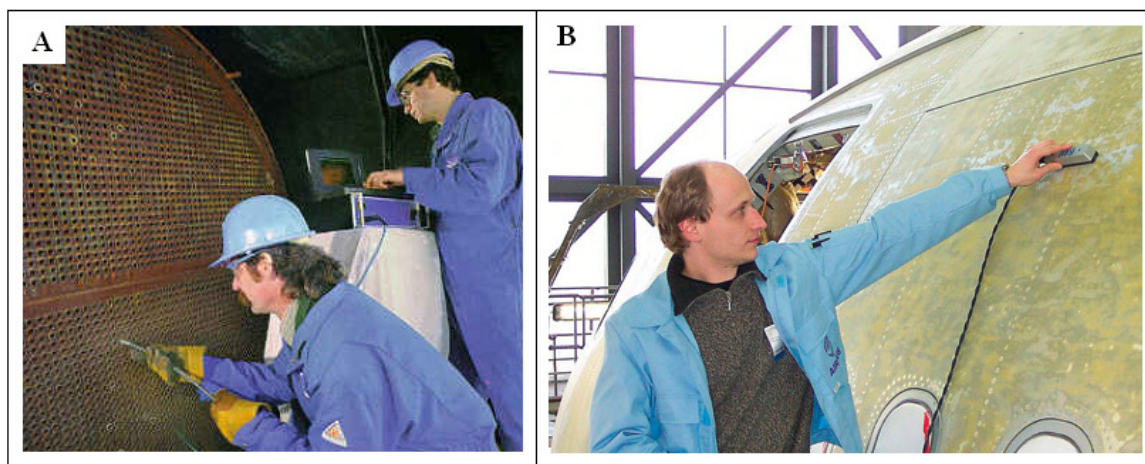


Figura 3.1: Aplicações típicas de inspeções por correntes parasitas. A: Inspeção de tubos de trocadores de calor. B: Inspeção de carenagem de aeronaves.

3.2 – Bibliografia relacionada sobre a identificação e quantificação da fase sigma nos aços inoxidáveis duplex

A partir da análise de trabalhos que abordaram a caracterização dos aços inoxidáveis duplex, verificou-se a existência de um leque de ensaios, que serão descritos abaixo, capazes de serem sensíveis às características microestruturais deste aço e em particular de identificar a presença da fase sigma na sua microestrutura. Serão destacados aqui alguns trabalhos [15, 28, 29] que utilizaram métodos magnéticos para a caracterização do aço duplex e obtiveram resultados relevantes.

O primeiro estudo destacado foi o realizado por Tavares [15], o qual teve como objetivo a identificação da fase sigma a partir de dois métodos magnéticos: medidas de saturação magnética utilizando a técnica VSM (*Vibrating Sample Magnetometer*) e medidas magnéticas com ferritoscópio. Para o ensaio, onze amostras foram obtidas do aço duplex UNS S31803, sendo que, deste total, cinco foram laminadas a frio. As amostras foram submetidas a diferentes períodos de envelhecimento com o objetivo de precipitar diferentes teores de fase sigma em cada amostra. Nas amostras laminadas a frio, a fração volumétrica de fase sigma variou de 7 a 43,5%, já nas amostras sem deformação, a porcentagem da fase deletéria ficou entre 0,2 e 10,9%. A figura 3.2 apresenta um dos resultados alcançados pelo autor, onde, é possível verificar as curvas de saturação

magnética (m_s) e de leitura do ferritoscópio (F) em função da porcentagem de fase sigma para amostras com deformação (*deformed samples*) e sem (*un-deformed samples*). A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que pequenos teores de fase sigma na microestrutura do aço duplex puderam ser identificados devido aos decréscimos da saturação magnética medidos com o VSM, e também pela diminuição dos valores apresentados pelo ferritoscópio. A conclusão obtida por Tavares [15] comprova portanto, que a presença da fase sigma na microestrutura do aço inoxidável duplex influencia diretamente nas suas propriedades magnéticas.

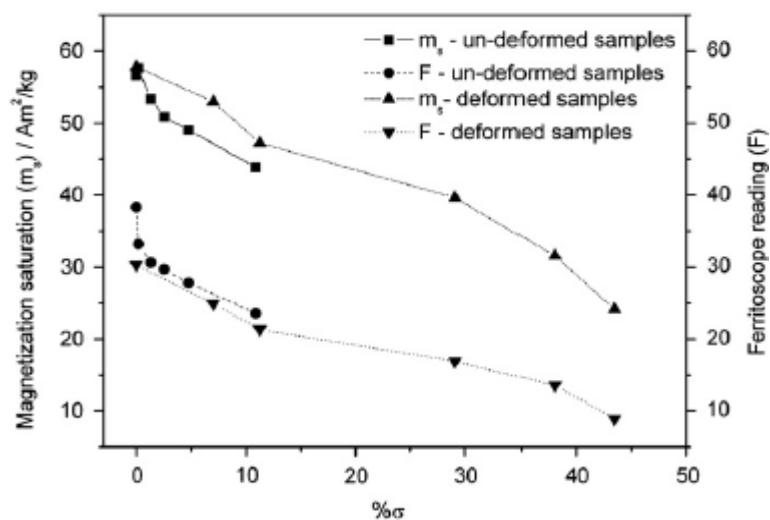


Figura 3.2: Curvas de saturação magnética (m_s) e de leitura do ferritoscópio (F) em função da porcentagem de fase sigma para amostras com e sem deformação [15].

Além do estudo realizado por Tavares [15], foi analisado também o trabalho desenvolvido por Gubner [28], o qual teve também como objetivo a identificação da fase sigma na microestrutura do aço duplex.

Neste segundo trabalho, a caracterização do material foi realizada a partir das técnicas: MFM (microscopia de força magnética) e SKPFM (*Scanning Kelvin Probe Force Magnetic*). Para o ensaio de caracterização foram obtidas amostras do aço duplex 2205. Diferentemente do estudo feito por Tavares [15], o tratamento térmico de envelhecimento foi o mesmo para todas as amostras, onde inicialmente elas foram recozidas a uma temperatura de 1050°C e posteriormente resfriadas a uma taxa de

2°C/min com o objetivo de produzir uma grande quantidade de fase sigma para facilitar a caracterização do aço. A figura 3.3 apresenta a microestrutura do aço duplex com a fase sigma precipitada a partir do tratamento térmico realizado, a imagem foi obtida com um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Já a figura 3.4 apresenta uma imagem obtida a partir do microscópio de força magnética, nela, assim como na conseguida pelo MEV, é possível verificar as diferentes fases do material, onde, as regiões mais claras possuem uma menor força de atração magnética. Os resultados adquiridos por Gubner [28] foram suficientes para a identificação da fase sigma no aço inoxidável duplex e verificar que a presença da fase sigma por ser não magnética, influencia as propriedades magnéticas do aço duplex de forma geral. No entanto, os ensaios só foram realizados em amostras com uma alta fração volumétrica de fase sigma precipitada, deixando, deste modo, dúvida quanto o seu desempenho frente a pequenos teores da fase. Como foi visto anteriormente, pequenas quantidades de fase sigma na microestrutura do aço duplex podem comprometer severamente as propriedades mecânicas do aço [3, 7, 9, 10, 11, 15, 18].

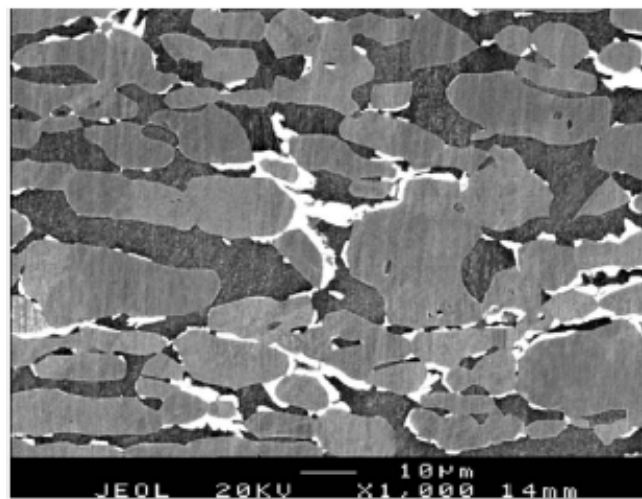


Figura 3.3: Imagem da microestrutura do aço duplex utilizado pelo autor. As regiões mais escuras correspondem à ferrita, as mais claras à fase sigma e a intermediária à austenita [28].

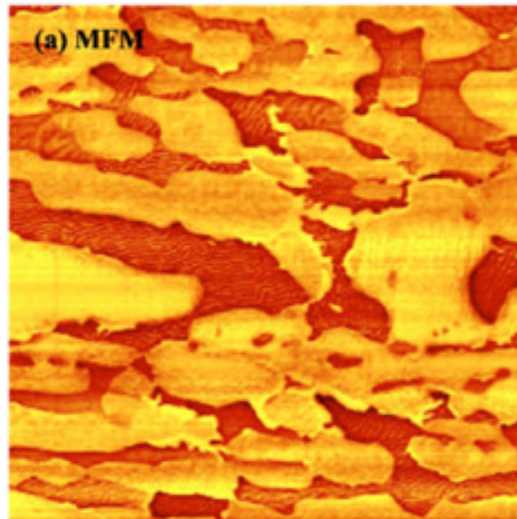


Figura 3.4: Imagem obtida a partir do microscópio de força magnética (MFM). As regiões mais claras indicam os domínios que possuem menor atração magnética [28].

Outro trabalho desenvolvido por Tavares [29] também foi analisado. O seu objetivo foi verificar as variações das propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex UNS S31803, após a sua exposição às temperaturas de 475°C e 800°C, a partir de medidas magnéticas (curva de histerese e análise termomagnética). Os resultados alcançados a partir das amostras que sofreram o tratamento térmico de 475°C não serão aqui contemplados, pois em tais amostras não foram observadas precipitações de fase sigma na microestrutura do aço. Para as amostras tratadas à 800°C, foram realizados cinco diferentes períodos de tratamento, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas e 4 horas, com o intuito de precipitar diferentes percentuais de fase sigma no aço. Inicialmente foi realizado um ensaio de impacto Charpy nas diferentes amostras e verificou-se que à medida que o tempo de exposição aumentava, a energia de impacto Charpy do aço duplex diminuía. Todas as amostras envelhecidas apresentaram um decréscimo na energia de impacto. Essa diminuição ocorre geralmente devido ao aumento da quantidade de fase sigma precipitada, que inclusive já foi discutido no capítulo dois. No entanto, segundo Tavares [29], após uma análise metalográfica e de difração de raios-X, não foi observado precipitações de fase sigma na amostra envelhecida por 15 minutos. Neste estágio inicial do envelhecimento foram encontradas precipitações de austenita secundária nos contornos de grão da ferrita, comprovando que esta fase também contribui para a fragilização do aço duplex. Nas amostras tratadas com um tempo

superior a 15 minutos, já se pôde encontrar a fase sigma juntamente com a austenita secundária nos contornos dos grãos ferríticos.

Para a avaliação magnética, foi traçada a curva de histerese, figura 3.5, para cada amostra tratada a 800°C e, em seguida, foram realizadas medidas magnéticas de coercividade magnética, saturação de indução, indução residual e o diferencial máximo de permeabilidade. Verificou-se que todas estas propriedades magnéticas decrescem à medida que se prolonga o período de envelhecimento. Segundo Tavares [29], esta diminuição se deve ao aumento do teor da fase austenítica, a qual é não-magnética. Em resumo, o processo de precipitação da fase sigma gera um decréscimo nas propriedades magnéticas do aço inoxidável duplex devido ao aumento da fração volumétrica da austenita, portanto, o monitoramento destas propriedades é uma alternativa interessante para a caracterização do aço em questão.

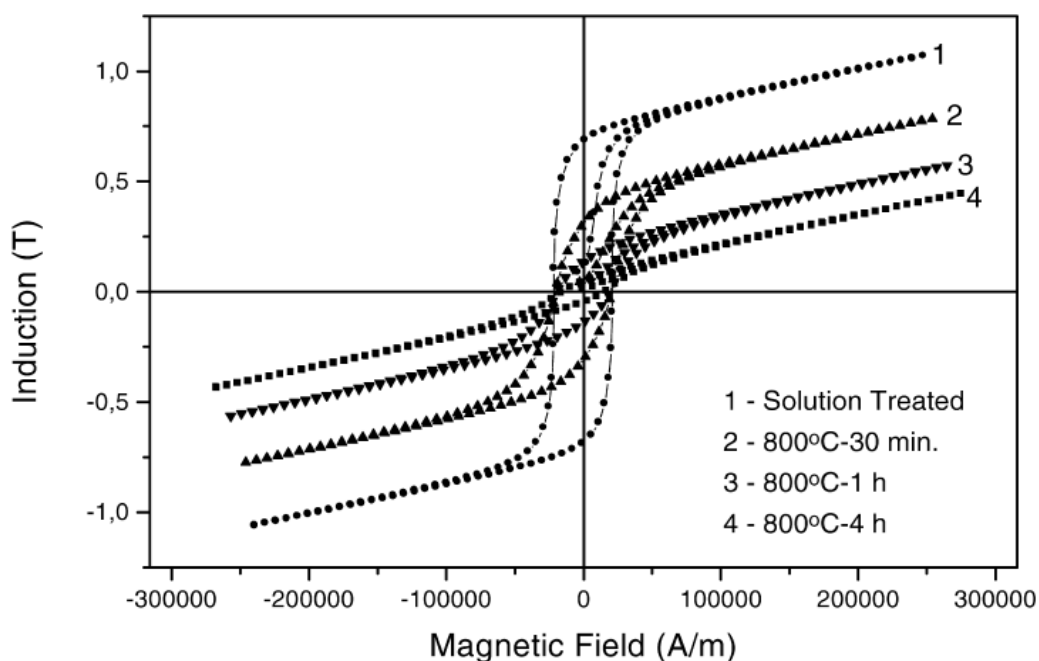


Figura 3.5: Curva de histerese do aço inoxidável duplex para diferentes períodos de envelhecimento na temperatura de 800°C [29].

Além dos listados, outros trabalhos também apresentam bons resultados frente a caracterização do aço inoxidável duplex, Zucato [30], Martins [6]. Apesar das técnicas

empregadas pelos trabalhos listados apresentarem bons resultados frente a caracterização do aço, tais técnicas possuem limitações que justificam a utilização do ensaio de correntes parasitas para a caracterização do aço inoxidável duplex.

3.3 – Justificativa para o uso de correntes parasitas na quantificação de fase sigma em aços inoxidáveis duplex.

Existem algumas técnicas de caracterização de materiais capazes de identificar e quantificar com precisão a quantidade de fase sigma precipitada nos aços inoxidáveis duplex. Algumas delas são: microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura, difração de raio-x, microscopia de força magnética, VSM (*Vibrating Sample Magnetometer*). Apesar das técnicas descritas serem na maioria das vezes precisas na caracterização da fase sigma, essas técnicas são consideradas destrutivas, tendo em vista que é necessário retirar uma amostra do material para que seja realizado o ensaio de caracterização. Na maioria das inspeções de campo não é possível retirar uma amostra dos equipamentos fabricados a partir do aço inoxidável duplex. Além das técnicas apresentadas serem destrutivas, fato que já diminui bastante as suas aplicações em campo, existe ainda o problema relacionado com o tamanho destes equipamentos de caracterização, sendo em sua maioria de grande porte (figura 3.6) e, portanto, estando geralmente imobilizados em laboratórios, dificultando ainda mais o processo de inspeção. Tais equipamentos são específicos para pesquisa, sendo dificilmente utilizados para inspeção de campo.

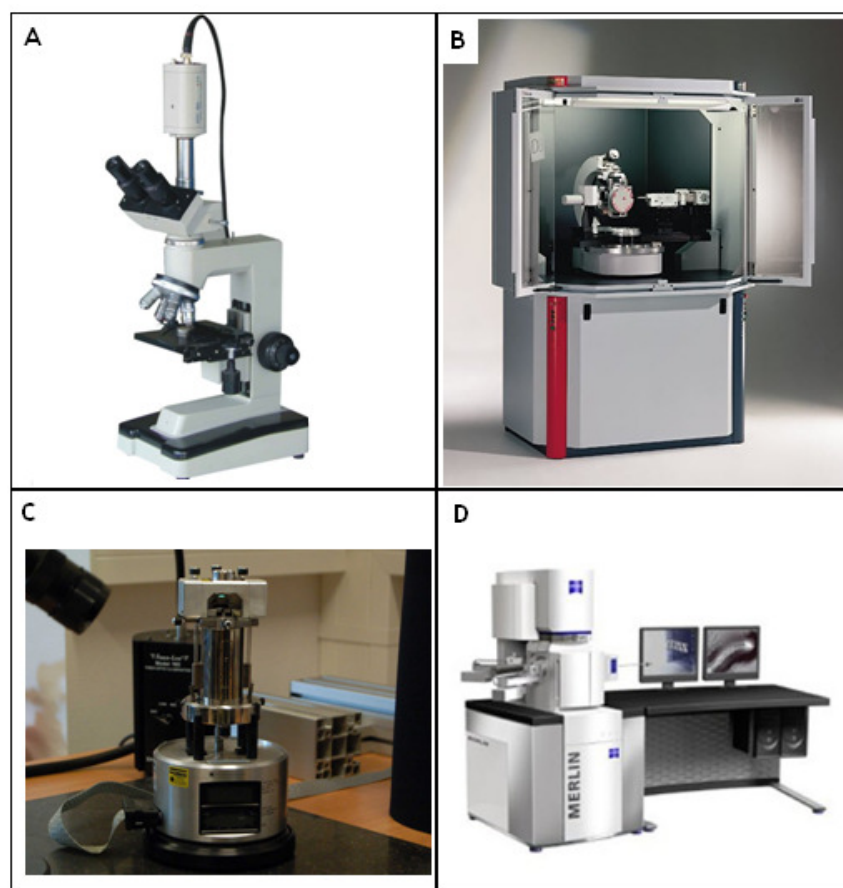


Figura 3.6: Alguns equipamentos para caracterização de materiais. A: Microscópio ótico; B: Difração de raio-x; C: Microscópio de força magnética; D: Microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Portanto, visando a inspeção do aço duplex, verificou-se a necessidade de uma técnica de ensaio que seja capaz de identificar e quantificar a presença da fase sigma nos aços inoxidáveis duplex de maneira não destrutiva, sendo portátil e, de tal forma, que a resposta à presença de fases deletérias seja imediata.

A partir da análise de alguns trabalhos realizados por Todorov [4], Assis [5] e Rebello [3], verificou-se que a técnica não destrutiva por correntes parasitas aponta-se altamente capacitada para tal aplicação.

3.4 – Bibliografia relacionada sobre a inspeção do aço inoxidável duplex a partir da técnica de ensaios não destrutivos por correntes parasitas

Como mencionado anteriormente, as duas fases originais presentes no aço inoxidável duplex, ferrita (δ) e austenita (γ), possuem diferentes propriedades elétricas e magnéticas. A fase γ apresenta uma condutividade elétrica alta, em contra partida, possui uma permeabilidade magnética baixa. A fase δ é justamente o inverso da γ , apresentando uma baixa condutividade elétrica e uma alta permeabilidade magnética [3]. Quando ambas as fases estão em proporções iguais na microestrutura do aço duplex, o aço apresenta um determinado comportamento magnético. No entanto, como dito anteriormente, a presença da fase sigma causa uma mudança no balanço microestrutural do aço e consequentemente uma alteração nas suas propriedades magnéticas.

Dentre os trabalhos que utilizaram a técnica de correntes parasitas para a identificação de fase sigma nos aços inoxidáveis duplex, destacam-se o realizado por Rebello [3] e Todorov [4], os quais serão descritos abaixo.

Primeiramente será destacado o trabalho desenvolvido por Rebello [3]. Onde, o experimento foi iniciado a partir da obtenção de oito amostras do aço duplex solubilizadas, isto é, com a sua microestrutura balanceada e sem a presença de fases deletérias. Em seis dessas oito amostras, foram feitos diferentes tratamentos térmicos de envelhecimento (tabela 1), com o objetivo de precipitar quantidades de fase sigma desiguais em cada uma das amostras. Duas das amostras não passaram pelo processo de envelhecimento, servindo como referência para a comparação com as demais envelhecidas. Para determinar a quantidade de cada fase presente na microestrutura do aço foram utilizadas as seguintes técnicas de caracterização: microscópio eletrônico de varredura e microscópio óptico. A contagem da fração volumétrica de cada fase presente foi feita a partir do padrão de contagem ASTM E1245-03.

Amostra	Tratamento térmico	Tempo de tratamento térmico	Porcentagem de Austenita	Porcentagem de Ferrita	Porcentagem de Fase Sigma
1	1120° C	1 h	44.56%	55.44%	0%
2	1120° C	1 h	44.51%	55.49%	0%
3	800° C	½ h	43.38%	55.92%	0.70%
4	800° C	½ h	43.56%	55.69%	0.75%
5	800° C	1 h	49.10%	42.46%	8.44%
6	800° C	1 h	45.76%	45.88%	8.36%
7	750° C	2 h	47.25%	37.12%	15.63%
8	750° C	2 h	47.28%	37.64%	15.08%

Tabela 3.1: Amostras com diferentes tratamentos térmicos resultando em quantidades desiguais de fase sigma. Adaptado de Rebello *et.all* [3].

A partir do conhecimento da microestrutura de cada uma das amostras foi testada a capacidade da técnica de correntes parasitas em distinguir a porcentagem de fase sigma em cada uma das amostras.

A sonda utilizada por Rebello [3] para a caracterização do aço inoxidável duplex possui as dimensões em milímetros apresentada pela figura 3.7. O núcleo, ou entreferro, da sonda é um aço hipereutetóide, e, a bobina foi confeccionada com um fio de cobre de 33 AWG (*American Wire Gauge*) ou 0,18mm, possuindo no total 1000 espiras.

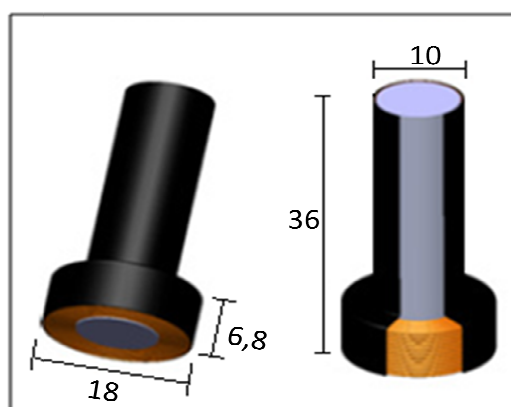


Figura 3.7: Esquemático da sonda de correntes parasitas utilizada por Rebello [3] para a caracterização do aço inoxidável duplex.

Para a determinação da frequência de trabalho da sonda absoluta, o autor utilizou um analisador de impedância do fabricante Agilent, modelo 4294A. Com esta ferramenta o autor pôde verificar em qual frequência a bobina da sonda de correntes parasitas apresentou uma maior sensibilidade [3]. A figura 3.8 apresenta um gráfico que relaciona a indutância em função da frequência, destacando em uma linha pontilhada vertical a melhor frequência de operação da sonda.

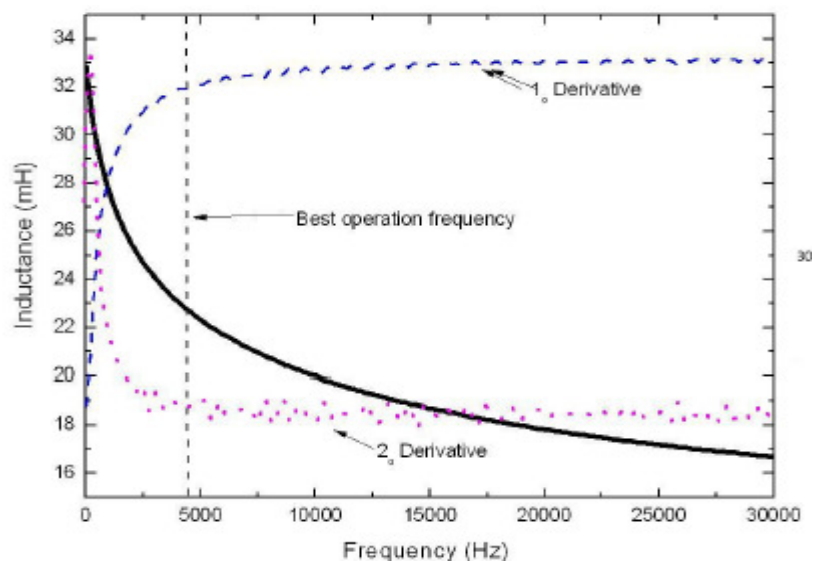


Figura 3.8: Resultado obtido com o analisador de impedância. Em destaque a frequência de operação (4kHz) utilizada na sonda desenvolvida por Rebello [3].

Com o auxílio da sonda de correntes parasitas operando numa frequência de 4kHz, quatro amostras foram inspecionadas com o objetivo de diferenciá-las a partir da quantidade de fase sigma precipitada. A figura 3.9 ilustra o resultado obtido da inspeção das amostras.

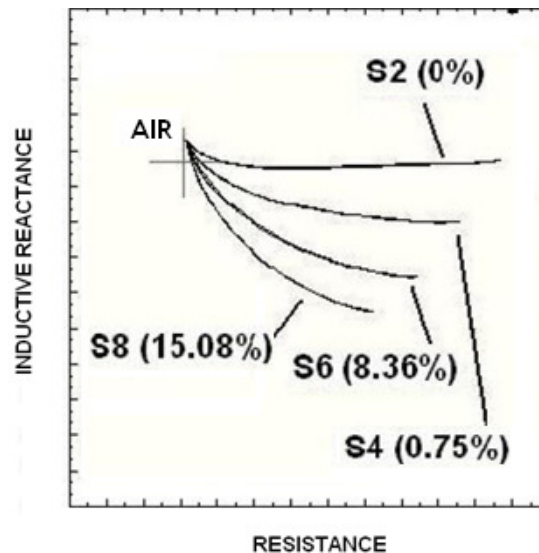


Figura 3.9: Resultado de inspeção de quatro amostras a partir da técnica de correntes parasitas [3].

Como pôde ser observado pela figura 3.9, todas as amostras apresentaram um aumento na resistência quando a sonda é deslocada do ar para a superfície da amostra. Este aumento da resistência é esperado nos ensaios de correntes parasitas (figura 2.15 do capítulo dois), pois à medida que a sonda se aproxima da amostra condutora, correntes parasitas são geradas na sua superfície drenando energia da bobina, acarretando então, em um aumento da sua resistência [22]. Com relação à reatância indutiva, pôde ser analisado que, à medida que a aumenta-se a quantidade de fase sigma precipitada na microestrutura do aço, o valor da reatância indutiva é cada vez menor. Esta diminuição já era esperada e comprova o fato da precipitação de fase sigma (não-magnética) interagir com a fase ferrítica (magnética) e alterar (diminuir) a permeabilidade magnética das amostras.

Portanto, o trabalho realizado por Rebello [3], além de comprovar que a precipitação da fase sigma é responsável por mudanças nas propriedades magnéticas do aço, divulgou que a técnica de inspeção por correntes parasitas é uma ferramenta poderosa para a caracterização da microestrutura do aço inoxidável duplex quanto à precipitação desta fase deletéria.

Outro trabalho destacado é o desenvolvido por Todorov [4], onde, assim como Rebello [3], o autor utiliza sondas absolutas para a caracterização do aço inoxidável duplex. As

amostras utilizadas no trabalho apresentavam teores de fase sigma que variavam de 0,6% (L2507-1) até 10,2% (L2507-7) e de 0% (K2507-0) até 5,2% (K2507-5). Em relação ao teor de ferrita, as amostras apresentavam uma variação de 39% (K2507-0) até 23% (K2507-5), onde, as que apresentam um menor teor de ferrita consequentemente apresentam uma maior quantidade de fase sigma precipitada. Diferentes posições da mesma amostra foram inspecionadas com o intuito de verificar a reprodutibilidade das medidas. Os resultados de inspeção, apresentados pela figura 3.10 ‘A’ e ‘B’ mostram que à medida que se amplia a quantidade de fase sigma precipitada, a variação (“espalhamento”) do sinal também é cada vez maior. As barras em vermelho na figura 3.10 ‘B’ indicam a variação das medidas, que, inclusive, acabam se sobrepondo e consequentemente dificultando a separação dos resultados.

Em resumo, os resultados alcançados por Todorov [4], também comprovaram que em relação à identificação de fase sigma nos aços inoxidáveis duplex, a técnica de correntes parasitas convencional é uma técnica eficaz e confiável.

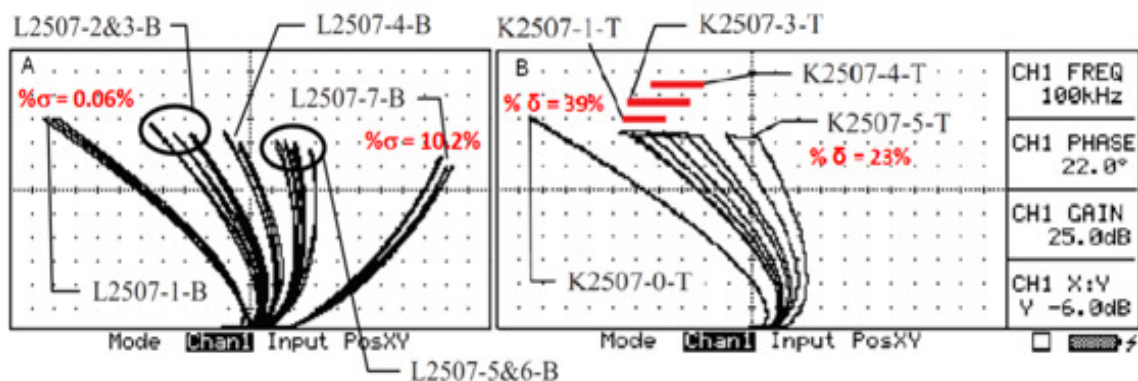


Figura 3.10: Tela do equipamento utilizado por Todorov [4] apresentando o resultado de inspeção das amostras com diferentes teores de fase sigma [4].

Como mencionado anteriormente, além da precipitação de fases deletérias nos aços inoxidáveis duplex, existe ainda, o problema de desbalanceamento microestrutural. Analisando outro trabalho desenvolvido por Rebello [31], constatou-se que a sonda de correntes parasitas que apresentou um excelente resultado frente à identificação de fase sigma, não foi capaz de diferenciar as microestruturas desbalanceadas (com diferentes

porcentagens de ferrita e austenita) das solubilizadas (porcentagens iguais de ferrita e austenita). As amostras utilizadas para o ensaio foram: uma solubilizada (50/50), duas com microestruturas desbalanceadas (70/30 e 80/20) e três com fase sigma (0,75%, 8,5% e 15%). A figura 3.11 apresenta duas imagens obtidas com um MEV da microestrutura do aço inoxidável duplex desbalanceada, onde, a da esquerda possui 80% de ferrita e 20% de austenita e a imagem da direita 70% da fase ferrítica e 30% da fase austenítica.

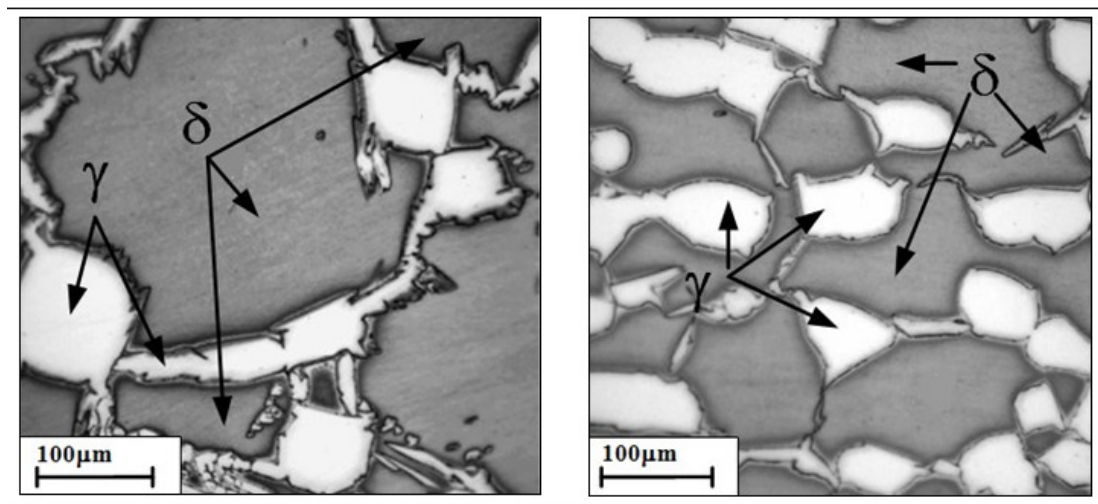


Figura 3.11: Imagens obtidas com um MEV da microestrutura do aço inoxidável duplex com diferentes porcentagens de ferrita e austenita [31].

A figura 3.12 apresenta o resultado em termos de fase e amplitude do sinal de inspeção de amostras com diferentes teores de fase sigma e com microestruturas com diferentes porcentagens de ferrita e austenita. Como é possível visualizar, as amostras que apresentam a fase deletéria foram facilmente diferenciadas, no entanto, as com uma elevada quantidade de ferrita praticamente ficaram com o mesmo resultado que a amostra solubilizada, tanto em termos de fase quanto de amplitude. Esta dificuldade de discriminar as amostras com desbalanceamento das solubilizadas foi averiguada pelo autor.

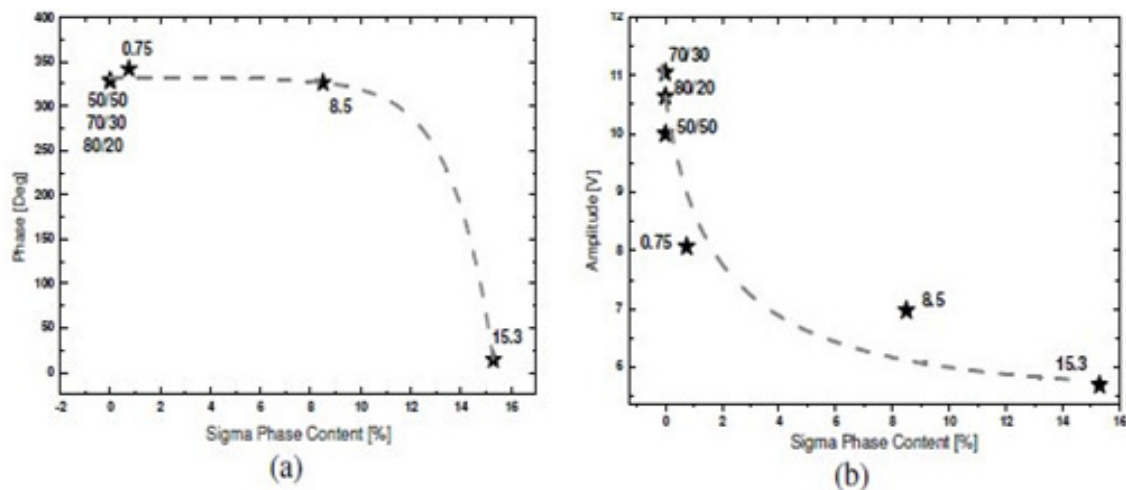


Figura 3.12: Comportamento dos parâmetros de correntes parasitas em função da porcentagem de fase sigma: (a) Fase; (b) Amplitude. [31].

Rebello [31] investigou tal resultado traçando as curvas de histereses para cada amostra. Ao analisar a magnetização em função do campo magnético aplicado, figura 3.13 ‘a’, constatou-se que realmente existe uma boa distinção entre as amostras com diferentes frações volumétricas de fase sigma e a solubilizada (0% de fase sigma). Além disso, verificou-se que as amostras desbalanceadas também apresentam diferenças no comportamento magnético em relação à solubilizada, entretanto, somente a partir de um estágio elevado de magnetização. Na região com pouco campo magnético aplicado não foi possível encontrar diferenças no comportamento magnético entre a amostra solubilizada e as amostras com microestruturas desbalanceadas. Sabendo-se que os sensores de correntes parasitas operam com um campo magnético baixo, entende-se o porquê da técnica não conseguir distinguir amostras desbalanceadas das solubilizadas.

A partir da análise da figura 3.13 ‘a’ fica claro que, à medida que a quantidade de ferrita diminui, o nível de saturação magnética é menor. Isso é esperado, pois a ferrita é ferromagnética e a austenita é não magnética. Contudo, este efeito só é possível ser observado quando se aplica elevados campos magnéticos. Para baixos campos magnéticos aplicado, como é o caso dos sensores de correntes parasitas, a quantidade de ferrita não altera suficientemente as características magnéticas do material, de forma que possam ser detectadas pelas sondas de correntes parasitas, figura 3.13 ‘b’.

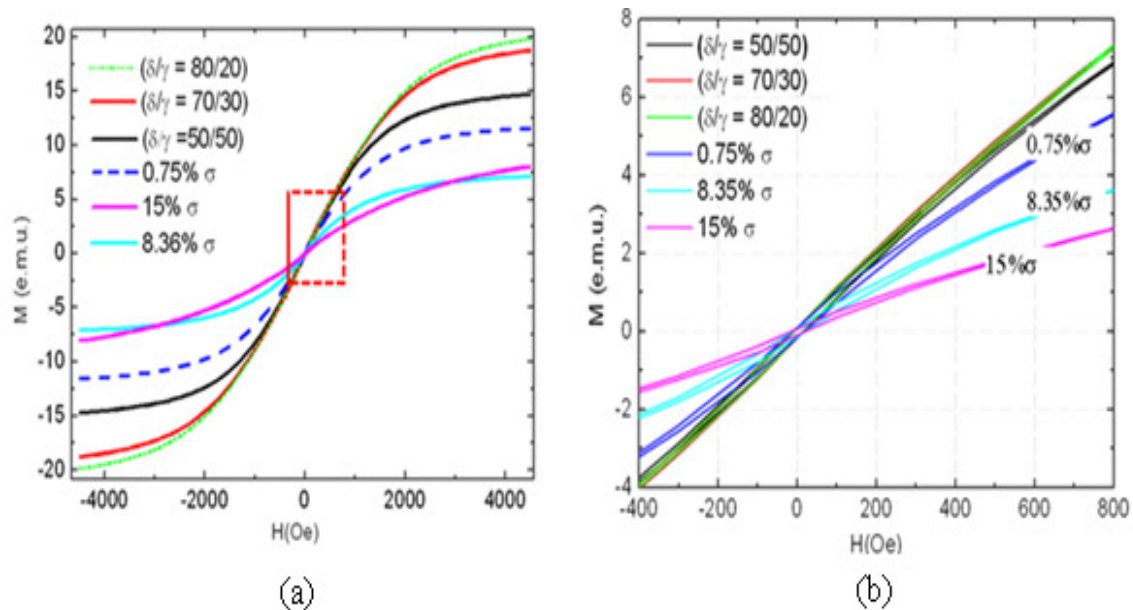


Figura 3.13: Curva M-H obtidas a partir do VSM (*Vibrating Sample Magnetometer*). (a) Loop completo destacando a região na qual as correntes parasitas operam. (b) Zoom da região em destaque na imagem ‘a’ [31].

3.5 – Considerações sobre o atual uso da inspeção por correntes parasitas para a caracterização do aço inoxidável duplex

Como pôde ser observado, há um vasto campo de aplicações para a técnica de inspeção por correntes parasitas. Tratando-se da inspeção do aço inoxidável duplex verificou-se que a técnica de correntes parasitas apresentou bons resultados no que diz respeito à identificação de fases deletérias. Contudo, após a análise da bibliografia relacionada, não foram encontrados uma quantidade expressiva de trabalhos que utilizassem a técnica de correntes parasitas para a caracterização de fases deletérias nos aços inoxidáveis duplex, e, tais trabalhos utilizam somente sondas absolutas para tal caracterização, deixando, portanto, uma gama de outras sondas com desempenho ainda desconhecido frente à inspeção deste aço. Além disso, as sondas apresentadas possuem dimensões relativamente grandes, o que impossibilita o seu uso para a inspeção de zonas termicamente afetadas (ZTAs) em juntas soldadas.

3.6 - Justificativa e motivação para desenvolver sondas para a inspeção do aço inoxidável duplex

Apesar dos aços inoxidáveis duplex não serem considerados materiais novos, somente a partir das descobertas do pré-sal e dos desafios relacionados a esta descoberta que este material vem ganhando um espaço relevante no cenário petroquímico nacional [32]. Até pouco tempo, a demanda para a produção deste material era muito pequena devido ao seu alto custo e, portanto, a quantidade de equipamentos manufaturados a partir deste aço era consideravelmente pequena, fazendo com que não houvesse um interesse da comunidade científica em desenvolver estudos para a inspeção de tais equipamentos. Tendo em vista que explorar a camada pré-sal significa dar um salto de três para sete mil metros abaixo da lâmina d'água, foi preciso rever todos os equipamentos de exploração e produção que já haviam sido consolidados para as aplicações em profundidades menores, fazendo com que, os aços inoxidáveis duplex adentrassem de vez o mercado petrolífero reforçando tais equipamentos. Atualmente, os aços inoxidáveis duplex apresentam uma relevante importância no cenário petrolífero, um exemplo, é a inclusão deste aço nas camadas dos tubos flexíveis que serão instalados no pré-sal [32]. Para suportar a pressão da coluna d'água, os tubos que conduzem o petróleo do poço até a plataforma devem apresentar alta resistência mecânica. Além disso, a acidez do óleo encontrado no pré-sal exige materiais mais resistentes à corrosão. O aço duplex não só conjuga essas características, como apresenta um elevado limite de escoamento, implicando na utilização de espessuras finas, o que torna a solução mais competitiva. Dada a relevância deste aço no panorama atual, viu-se a necessidade de desenvolver estudos para a sua inspeção a partir de ensaios não destrutivos. Até então, como dito anteriormente, poucos trabalhos foram publicados nesta área, porém, nos analisados, a técnica de inspeção por correntes parasitas mostrou-se bastante eficaz na detecção de fases deletérias. Entretanto, ainda possui muito a se investigar sobre esta técnica, visto que somente sondas absolutas foram utilizadas nos trabalhos desenvolvidos.

A crescente utilização dos aços inoxidáveis duplex no mercado petrolífero, juntamente com a pequena quantidade de trabalhos encontrados sobre a sua inspeção, justificam e motivam o trabalho em questão.

Capítulo 4 – Materiais e Métodos.

4.1 – Introdução

Foram realizados os seguintes desenvolvimentos/experimentos:

- Preparação de amostras.
- Aprimoramento de uma sonda absoluta. Com o auxílio do software comercial COMSOL Multiphysics pretende-se aprimorar os parâmetros da sonda absoluta que apresentou um bom resultado frente à caracterização do aço.
- Teste de caracterização com sondas de correntes parasitas convencionais.
- Teste de caracterização com sondas de correntes parasitas não convencionais.
- Desenvolvimento de sondas específicas para aplicação na detecção de fase sigma nos aços inoxidáveis duplex.

A partir da análise dos resultados com as sondas não comerciais foi feito um desenvolvimento a partir da sonda que apresentou o melhor resultado, ajustando-a para a aplicação específica da detecção de fase sigma principalmente nas zonas termicamente afetadas.

4.2 – Preparação das amostras

Doze amostras do aço inoxidável duplex, especificação UNS S31803, com dimensões apresentadas pela figura 4.1 e composição química apresentada na tabela 2, foram submetidas a diversos tratamentos térmicos. Das doze amostras, cinco foram preparadas com o intuito de precipitar diferentes teores de fase sigma, cinco para obter diferentes porcentagens de austenita e ferrita e duas solubilizadas. Inicialmente, todas as amostras foram submetidas ao tratamento térmico preliminar de solubilização (Sol.), com o

intuito de garantir que todas as amostras estivessem balanceadas, isto é, com aproximadamente o mesmo teor de ferita/asutenita e sem a presença de fases deletérias. O tratamento de solubilização foi conduzido a uma temperatura de 1120 °C durante uma hora. Cinco amostras foram submetidas ao tratamento de envelhecimento (env.) com o objetivo de provocar a precipitação da fase sigma. O tratamento foi realizado a 800 °C, sendo que, o tempo de permanência no forno variou de acordo com a quantidade desejada de fase sigma precipitada. As cinco amostras restantes foram submetidas a uma temperatura de envelhecimento acima da utilizada no processo de solubilização, com o intuito de produzir um desbalanceamento na microestrutura. Todas as amostras quando retiradas do forno passaram por uma têmpera em água. Para a contagem das fases presentes, foi retirado uma sub-amostra de cada amostra tratada termicamente e feito um embutimento a frio para facilitar o processo de polimento. Depois de polidas pelo procedimento metalográfico convencional, as amostras foram atacadas a partir de um processo eletrolítico, com aplicação de uma ddp de 3 volts por 10 segundos, com uma solução de KOH (hidróxido de potássio) com concentração de 40%. O objetivo deste ataque é salientar a fase ferrítica e a fase sigma, facilitando assim a sua identificação nas imagens obtidas com microscópio. O microscópio ótico ZEISS modelo AX10, foi o utilizado para a captura das imagens da microestrutura das amostras. Depois de obtidas as imagens, foi feito o processo de contagem das fases a partir da norma ASTM E1245-03 [34].

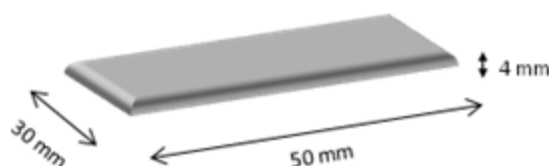


Figura 4.1: Dimensão das amostras do aço inoxidável duplex.

Elemento	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr
UNS S 31803 (%)	0,034	0,283	1,78	5,58	2,87	22,02

Tabela 4.1: Composição química do aço inoxidável duplex utilizado.

A tabela 3 detalha os processos realizados e os resultados alcançados em cada tratamento.

Amostra (#)	Tratamento Térmico	Temperatura (°C)	Tempo de tratamento (h)	Porcentagem de austenita (%)	Porcentagem de ferrita (%)	Porcentagem de fase sigma (%)
01a	Sol.	1200	1	45,00	55,00	0
01b	Sol.	1200	1	44,50	55,50	0
07	Sol. + env.	1200 + 800	1 + 1/2	43,38	55,92	0,70
19	Sol.+ env.	1200 + 800	1 + 3/4	44,80	52,10	3,10
18	Sol. + env.	1200 + 800	1+ 3/4	44,90	51,60	3,50
02	Sol. + env.	1200 + 800	1 + 1	45,76	45,88	8,36
10	Sol. + env.	1200 + 750	1 + 2	47,28	37,6	15,04
03	Sol. + env.	1200 + 1260	1 + 1	30,00	70,00	0
22	Sol. + env.	1200 + 1260	1 + 1	28,95	71,05	0
23	Sol. + env.	1200 + 1260	1 + 1	28,99	71,01	0
24	Sol. + env.	1200 + 1300	1 + 1	27,97	72,03	0
04	Sol. + env.	1200 + 1300	1 + 2	21,05	78,95	0

Tabela 4.2: Tratamentos térmicos realizados e as porcentagens de cada fase presente na microestrutura do aço inoxidável duplex.

Além das amostras descritas acima, uma outra amostra com uma junta soldada com uma ZTA com dois milímetros também foi utilizada no trabalho.

4.3 – Sondas convencionais

Quatro sondas absolutas serão testadas e comparadas perante a identificação de fase sigma nos aços inoxidáveis duplex. Sendo duas sondas comerciais, uma desenvolvida pelo autor Rebello [3] e uma simulada e desenvolvida pelo trabalho em questão, onde, o detalhamento do desenvolvimento e a construção do sensor serão descritos no capítulo cinco.

4.3.1 – Sondas absolutas comerciais

Para verificar a necessidade do desenvolvimento de sondas especiais para a inspeção do aço inoxidável duplex, inicialmente foram testadas sondas comerciais. Duas sondas da fabricante ZETEC modelos DT 4500 e DT 30PS foram testadas. Segundo as especificações do fabricante, a sonda modelo DT 4500 foi desenvolvida objetivada à caracterização de materiais, enquanto que a modelo DT 30PS se aplica à detecção de defeitos. O motivo pelo qual se utilizou uma sonda específica para detectar defeitos para a identificação da fase sigma, foi o diâmetro da bobina (três milímetros), vislumbrando assim a possibilidade de utilizar tal sonda para a inspeção das zonas termicamente afetadas (ZTAs).

As sondas utilizadas apresentam as seguintes características:

- Sonda absoluta ZETEC DT 4500, faixa de operação 1-5 kHz. Diâmetro efetivo: 20mm. Figura 4.2 A.
- Sonda absoluta ZETEC DT 30PS, faixa de operação 50-500 kHz. Diâmetro efetivo: 3mm. Figura 4.2 B.

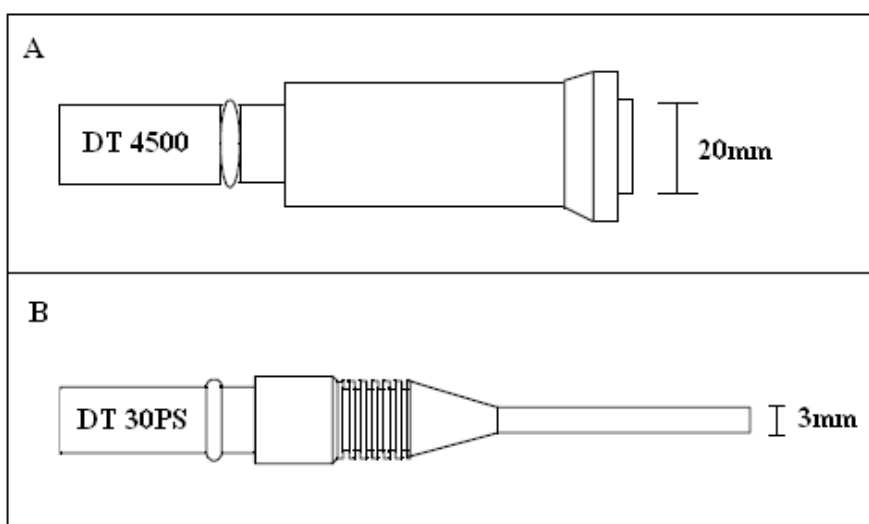


Figura 4.2: Sondas comerciais utilizadas para a inspeção dos aços inoxidáveis duplex.

A) Sonda absoluta dedicada a caracterização de materiais. B) Sonda absoluta dedicada a identificação de defeitos.

4.3.2 – Sondas absolutas desenvolvidas

Duas sondas absolutas não comerciais, que foram desenvolvidas especificamente para a inspeção do aço inoxidável duplex serão testadas. A sonda desenvolvida por Rebello [3] foi apresentada na revisão bibliográfica, capítulo três. A figura 4.3 apresenta a desenvolvida neste trabalho. Como pode ser verificado, as dimensões desta sonda são bastante parecidas com as apresentadas pela sonda desenvolvida pelo autor relacionado na revisão bibliográfica, no entanto, esta sonda apresenta algumas diferenças. Tais diferenças, os resultados de simulações que deram origem a esta sonda, bem como, os resultados de inspeção serão apresentado no capítulo cinco.



Figura 4.3: Foto da sonda absoluta construída neste trabalho.

Um gaussímetro do fabricante Trifield, modelo UHS, figura 4.4, será utilizado para medir a densidade do fluxo magnético gerado pelas bobinas das sondas absolutas de correntes parasitas. A principal finalidade da utilização do gaussímetro é poder

comparar os valores medidos diretamente na sonda com os obtidos nas sondas simuladas a partir do *software* COMSOL Mutltiphsics.



Figura 4.4: Gaussímetro *AC Milligauss Meter*, modelo *UHS*. Utilizado para comparar os valores reais, medidos diretamente na sonda com os valores obtidos com as simulações.

4.4 – Sondas não convencionais

Em parceria com a universidade polonesa *West Pomeranian University of Technology*, foram testadas sondas não encontradas comercialmente, mas que já haviam apresentados bons resultados frente a identificação de defeitos e caracterização de materiais. O objetivo deste teste é verificar a capacidade de sondas com desempenho já consolidado em diversas aplicações perante a identificação de fase sigma.

As sondas utilizadas para as inspeções do aço inoxidável duplex foram:

4.4.1 – Sonda Five legs

Operando de forma diferencial, este sensor possui cinco colunas de ferrita simetricamente espaçadas. Uma bobina de recepção (*pick-up coil*) é enrolada na coluna central e quatro bobinas de excitação nas colunas restantes, sendo que, em um eixo é enrolado um par das bobinas excitadoras possuindo a mesma polaridade e, no eixo perpendicular, as bobinas são enroladas com a polaridade invertida. Ambos os pares de excitação geram na bobina de recepção um fluxo magnético, entretanto, com o sentido oposto [35]. Na figura 4.5 B, as linhas de fluxo em vermelho representam o fluxo magnético gerado pelo par com certa polaridade e as em azul pelo par com polaridade contrária. O fluxo resultante na bobina de recepção é próximo de zero no estado de equilíbrio. O sinal de saída depende da diferença dos fluxos ϕ_y e ϕ_x .

Esta configuração diferencial da sonda permite a identificação de defeitos muito pequenos [36]. Inclusive, diversas inspeções já foram realizadas com tal arranjo e os resultados comprovaram tal eficiência [36-38].

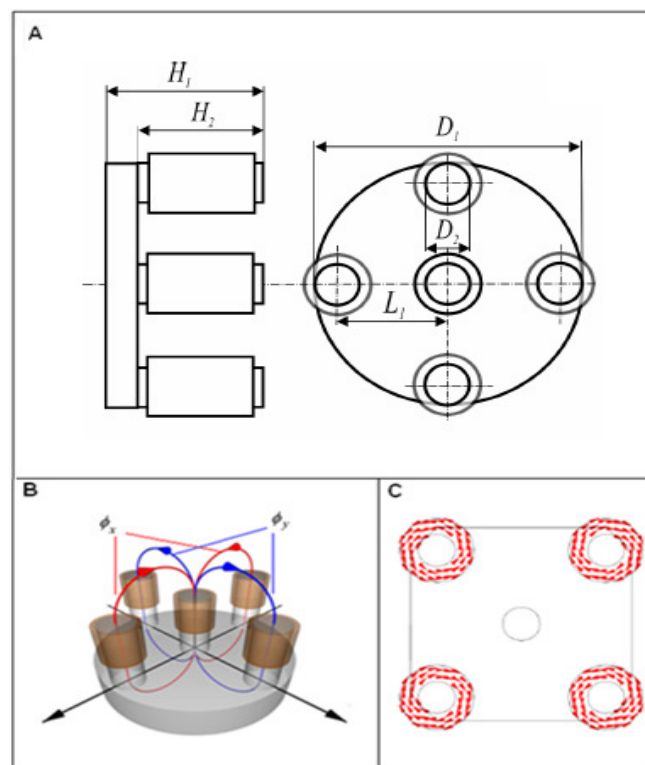


Figura 4.5: Sonda Five legs. A) Vista lateral e superior do transdutor, onde: $H_1 = 8$ mm, $H_2 = 5$ mm, $D_1 = 9$ mm, $D_2 = 1,5$ mm, $L_1 = 3,5$ mm. B) Vista da configuração diferencial da sonda [36-38]. C) Vista superior com o sentido da corrente em cada coluna [38].

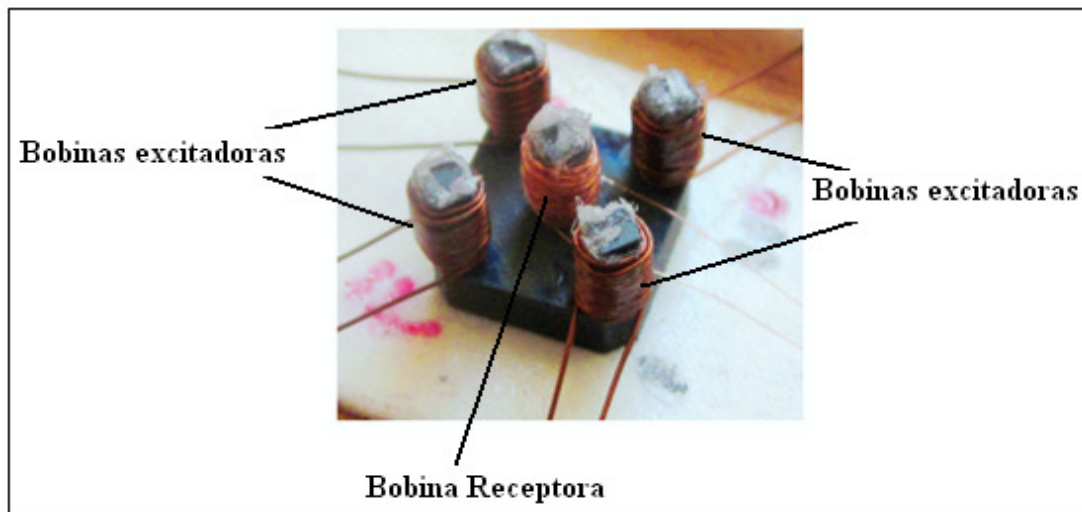


Figura 4.6: Foto da sonda Five Legs em estágio de construção. Em destaque as bobinas excitadoras e a bobina receptora.

4.4.2– Sonda TRod1 e TRod2

Estes arranjos consistem em um núcleo cilíndrico ferrítico com duas bobinas de excitação e duas bobinas de recepção, figura 4.7. Os enrolamentos responsáveis pela captação do sinal estão conectados de forma diferencial e os de excitação são independentes com polaridade invertida. Utilizado para caracterização de materiais, este sensor trabalha de forma comparativa, onde, uma bobina receptora está destinada a captar o sinal da amostra de referência e a outra do material que está sendo inspecionado. Como a saída do sensor é um sinal de diferença entre a bobina da amostra de referência e da inspecionada, caso ambas as amostras sejam iguais, o sinal de saída será nulo. Se o material que se deseja fazer a inspeção apresentar uma permeabilidade magnética ou/e uma condutividade elétrica diferente da referência, o sinal de saída, neste caso, será diferente de zero. Para esta configuração de sonda é importante calibrar o sistema com duas amostras iguais antes de começar o processo de inspeção para que se tenha certeza que o sinal seja nulo em tal condição. A figura 4.7 apresenta um

esquemático com a indicação de cada componente da sonda, inclusive com as amostras de referência e de inspeção. A figura 4.8 apresenta o dimensional das sondas.

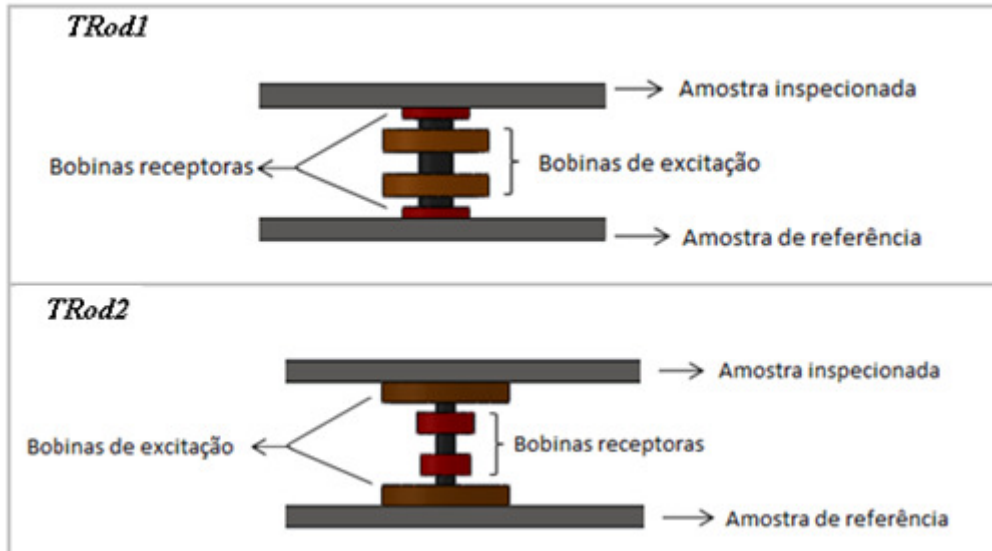


Figura 4.7: Configurações TRod1 e TRod2.

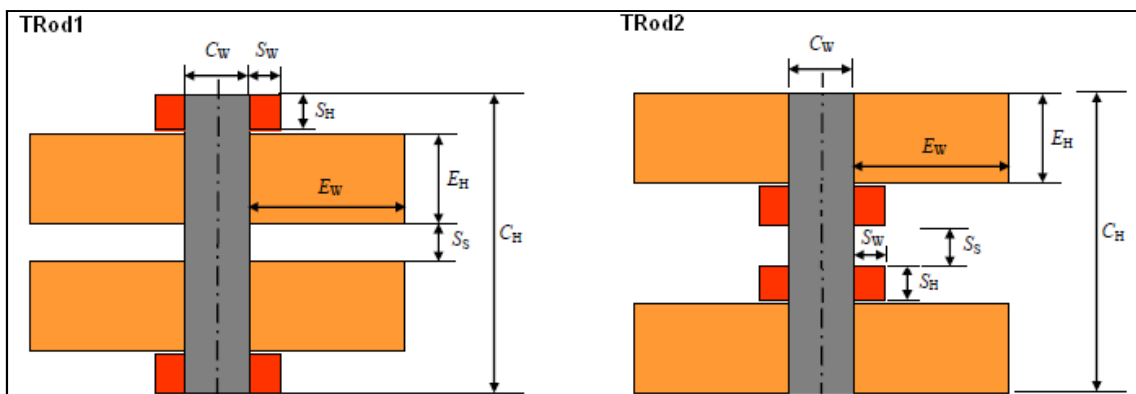


Figura 4.8: Seção das sondas e o dimensional. $C_H = 12$ mm, $E_w = 8$ mm, $C_w = 3$ mm, $S_s = 2$ mm, $E_H = 2$ mm, $S_w = 1,5$ mm, $S_H = 1,0$ mm [39].

O que diferencia a sonda TRod1 da TRod2 é a disposição das bobinas de excitação e recepção. Na TRod1 as bobinas de recepção ficam localizadas nas extremidades do núcleo enquanto as de excitação situam-se na parte central do cilindro. Uma vantagem desta configuração é que as bobinas de recepção estão próximas ao corpo de prova,

facilitando a detecção das correntes parasitas. Em contra partida, as bobinas excitadoras estão com um considerável *lift-off*, fazendo com que a energia transferida para o material inspecionado seja dificultada. Ou seja, se a energia transferida pelas bobinas de excitação for suficiente para gerar correntes parasitas no material, então, o sensor provavelmente terá uma boa resposta, dado que as bobinas de recepção estão próximas ao material inspecionado. A sonda TRod2 é exatamente o oposto da TRod1. As bobinas de excitação ficam muito próximas às amostras e as de recepção se localizam no centro do núcleo, figura 4.8. Portanto, nesta configuração o problema não é a energia transferida para a amostra e sim a capacidade de detecção das bobinas de recepção, dado que estão com um considerável *lift-off*. O objetivo da utilização de ambas as configurações é averiguar qual apresenta o melhor resultado frente a identificação da fase sigma. A figura 4.9 apresenta duas fotos da sonda TRod1 destacando os seus componentes.

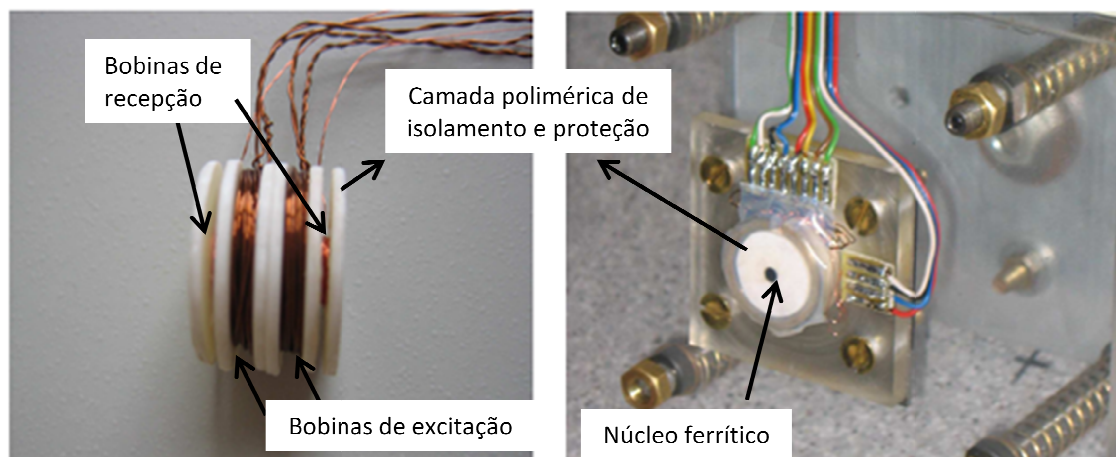


Figura 4.9: Fotos da sonda TRod1.

4.4.3– Sonda Double ‘C’ Core

Apresentando um formato em “H”, a sonda Double ‘C’ Core possui duas bobinas de captação (*pick-up coils*) e uma de excitação. Os enrolamentos de recepção do sinal, assim como nas sondas TRod1 e TRod2, estão conectados de forma diferencial. Esta

configuração, figura 4.10, pode ser utilizada para caracterização de materiais, entretanto, a sua principal finalidade é detectar defeitos não superficiais, devido a maior penetração das linhas de campo no material. Como as bobinas de recepção estão nas extremidades do sensor e conectadas de forma diferencial, é preciso utilizar uma amostra de referência assim como nas sondas TRod1 e TRod2.

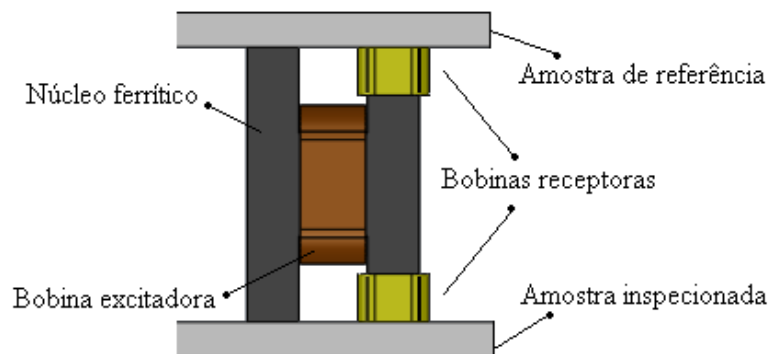


Figura 4.10: Sonda Double 'C' Core.

4.5 – Sondas TRod versus Double 'C' Core

Apesar das bobinas receptoras das sondas TRod1 e TRod2 e da Double 'C' Core estarem conectadas da mesma maneira, estas configurações possuem uma relevante diferença no comportamento do fluxo magnético gerado pelas bobinas de excitação. As sondas TRod1 e TRod2 apresentam um circuito magnético aberto enquanto que a Double 'C' Core um circuito fechado. A grande diferença destas configurações é que, no circuito aberto o fluxo magnético só é conduzido pelo núcleo no interior da bobina passando sempre em algum momento do seu laço pelo ar, enquanto que, no circuito fechado, o núcleo ferrítico conduz o fluxo durante toda a sua excursão. A vantagem do circuito fechado é que como o fluxo magnético fica confinado durante a sua excursão, ele fica mais concentrado ao passar pela bobina de recepção fazendo com que a sensibilidade do sensor aumente. A figura 4.11 ilustra a diferença entre os fluxos magnéticos gerados pelo circuito aberto e fechado.

Nos experimentos realizados, foi dada uma atenção especial na determinação de qual tipo de configuração magnética seria a mais indicada para detecção e quantificação do percentual de fase sigma.

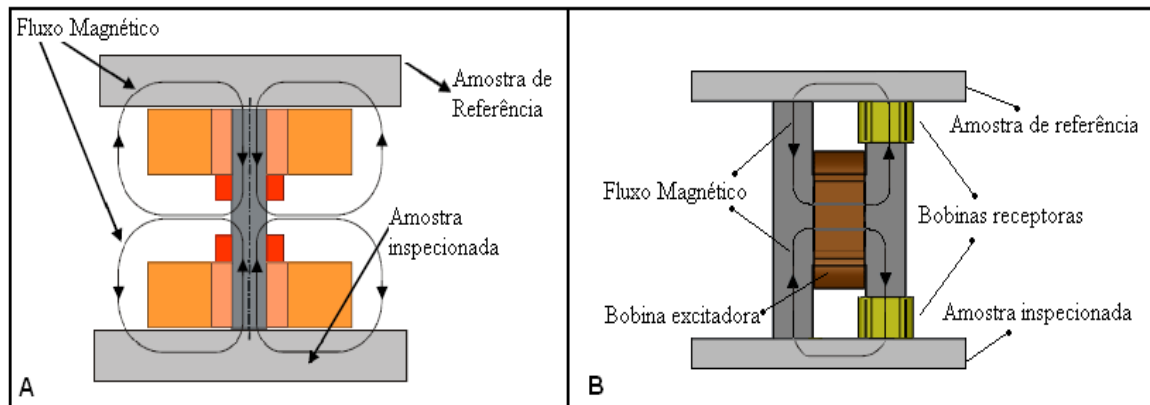


Figura 4.11: Configuração das sondas TRod2 e Double 'C' Core. Em destaque o fluxo magnético gerado pelas sondas. A) Circuito magnético aberto. B) Circuito magnético fechado.

4.6 – Desenvolvimento de sondas específicas

Com o objetivo de inspecionar as zonas termicamente afetadas (ZTAs) pelo processo de soldagem, foi desenvolvidas sondas em escalas reduzidas. Sabendo que, nos aços inoxidáveis duplex tais regiões podem chegar a ter dois milímetros de largura, foi preciso desenvolver sensores capazes de avaliar tais regiões, de forma que, as correntes parasitas geradas se localizem somente na região desejada, sem que haja interferência das regiões adjacentes, cordão de solda e metal de base.

A partir da análise dos resultados das sondas não convencionais perante a identificação de fase sigma, foram escolhidas as configurações de sensores que apresentarem o melhor resultado frente a esta caracterização e, tais sondas foram adaptadas para operar em uma escala reduzida, de forma que sejam capazes de inspecionar as ZTAs. Para esta adaptação/otimização foram feitas simulações em COMSOL Multiphysics, e, a partir

dos resultados de simulação foi construída a sonda de correntes parasitas dedicada à inspeção de ZTAs.

4.7 – Sistemas de medição

4.7.1 – Equipamento comercial ZETEC

O equipamento de correntes parasitas ZETEC apresenta diversas facilidades para o inspetor. Com a interface consideravelmente amigável, o equipamento pode ser utilizado tanto para detecção de trincas e micro-trincas, quanto para caracterização de materiais e medidas de revestimentos não condutores. Possui a capacidade de operar com sondas que trabalham na faixa de 5kHz - 8MHz [40]. Com o auxílio deste equipamento foi analisado o comportamento de duas sondas comerciais (mencionadas no item 4.3) frente a caracterização do aço inoxidável duplex. Os resultados serão apresentados no capítulo cinco. A figura 4.12 apresenta uma foto do equipamento ZETEC, modelo: MIZ-21B.



Figura 4.12 Equipamento comercial de correntes parasitas. ZETEC, modelo: MIZ-21B [40].

4.7.2 – Equipamento comercial OmniScan

Algumas sondas absolutas que não possuem compatibilidade com o equipamento ZETEC foram experimentadas com o aparelho OmniScan MX ECA. Uma grande vantagem deste aparelho é que sondas desenvolvidas em laboratório são facilmente adaptadas ao aparelho, pois o equipamento aceita como entrada sondas com conexão do tipo BNC. A figura 4.13 apresenta uma foto do equipamento OmniScan MX ECA.



Figura 4.13: Equipamento comercial OmniScan MX ECA [41].

4.7.3 – Equipamento desenvolvido pela *West Pomeranian University of Technology*

O equipamento foi desenvolvido em Labview e funciona da seguinte forma: duas ondas senoidais são geradas a partir de uma placa multifuncional de 16 bits da *National Instruments (DAQ board)*, estes sinais passam por um conversor digital/analógico (D/A) e são amplificadas pelo amplificador operacional APEX PB58A. Estes sinais, após serem amplificados são utilizados para alimentar as bobinas de excitação, esquema ilustrado na figura 4.14 A. O equipamento permite operar com sensores que trabalhem com no máximo dois módulos de excitação e, os parâmetros, frequência, amplitude e fase do sinal de excitação, podem ser alterados no painel de operação do equipamento. Tratando-se da frequência, é possível alterá-la diretamente via *software* e, os dois módulos de excitação possuem estritamente a mesma frequência, podendo operar em um intervalo de frequência de 1 - 100 kHz. O ajuste da amplitude pode ser feito em ambos os canais e tem como finalidade deixar as bobinas de excitação com a mesma configuração, dado que, é praticamente impossível enrolar duas bobinas exatamente idênticas. A alteração da fase do sinal de excitação garante que a polaridade das bobinas esteja do modo desejado.

A resposta obtida pela bobina de recepção (*pick-up coil*) é capturada a partir de um amplificador *Lock-In*, que é comumente utilizado para detectar sinais AC de baixíssima amplitude [41]. O *Lock-In* tem como saída a componente real e imaginária do sinal. Esta saída é digitalizada por um conversor analógico/digital (A/D) e é visualizada na tela de interface do *software*. A etapa crucial do equipamento é a captação e amplificação do sinal da bobina de recepção a partir do amplificador *Lock-in*, dado que o sinal pode ser de baixíssima amplitude e ruidoso. Portanto, é exigida uma programação cuidadosa dos parâmetros do amplificador. A geração/aquisição dos sinais é feita a partir de uma placa de aquisição multifuncional de 16 bits da *National Instruments (DAQ board)* e é controlada via entrada USB pelo computador. A figura 4.14 ‘a’ apresenta um diagrama de blocos do funcionamento do equipamento e a 4.14 ‘b’ uma foto.

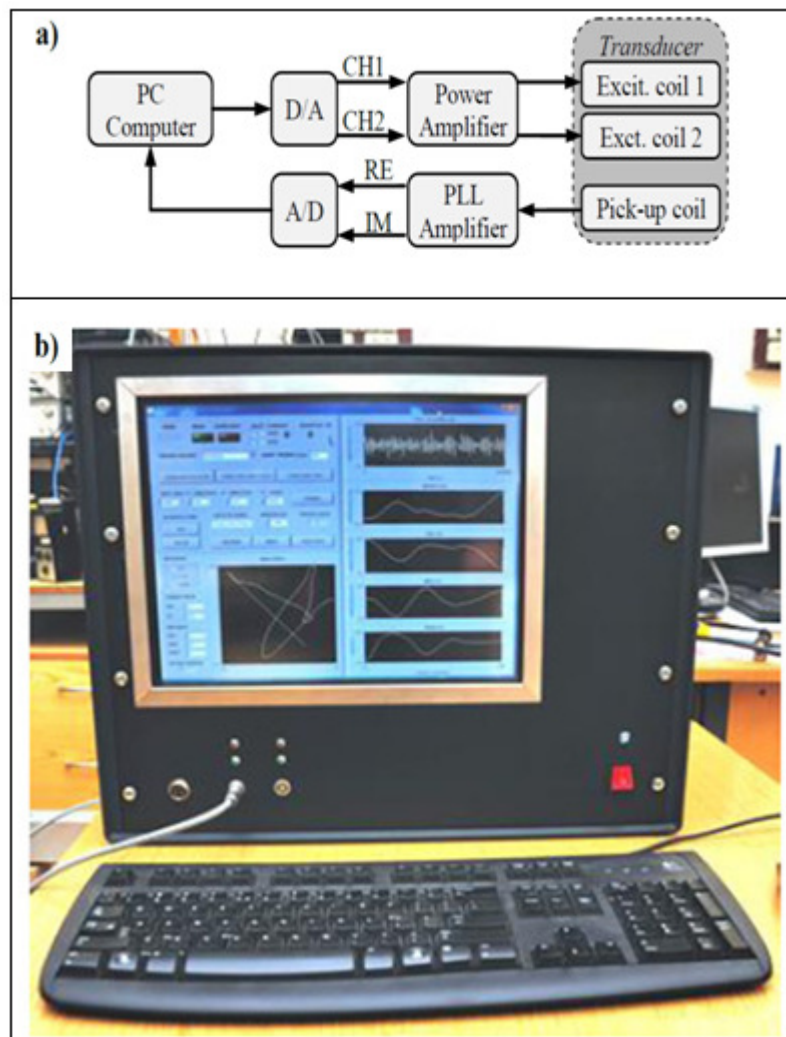


Figura 4.14: Equipamento desenvolvido pela *West Pomeranian University of Technology*. a) Diagrama de blocos. b) Foto do equipamento. [42].

4.8 – Varredura das amostras

Doze amostras foram inspecionadas com todos os sensores apresentados anteriormente. Para avaliar a repetibilidade das medidas foi feito uma varredura sempre na região central, para evitar que as bordas das amostras concentrem as correntes parasitas geradas no material inspecionado e corrompam as medidas, figura 4.15. Depois de feita a varredura foi feito a média das medidas na maioria das inspeções. Os sensores foram acoplados sob pressão nas amostras para evitar efeitos de *lift-off*, a figura 4.16 apresenta a mesa utilizada para fazer as varreduras, destacando o suporte utilizado para evitar o efeito de *lift-off*. Algumas amostras tiveram uma de suas faces polidas para que fosse possível avaliar a diferença de resposta do sensor em função da superfície.

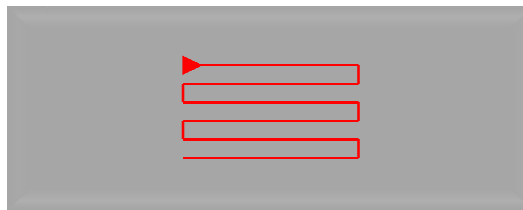


Figura 4.15: Esquemático com a vista frontal da amostra com o percurso de varredura das sondas não convencionais.

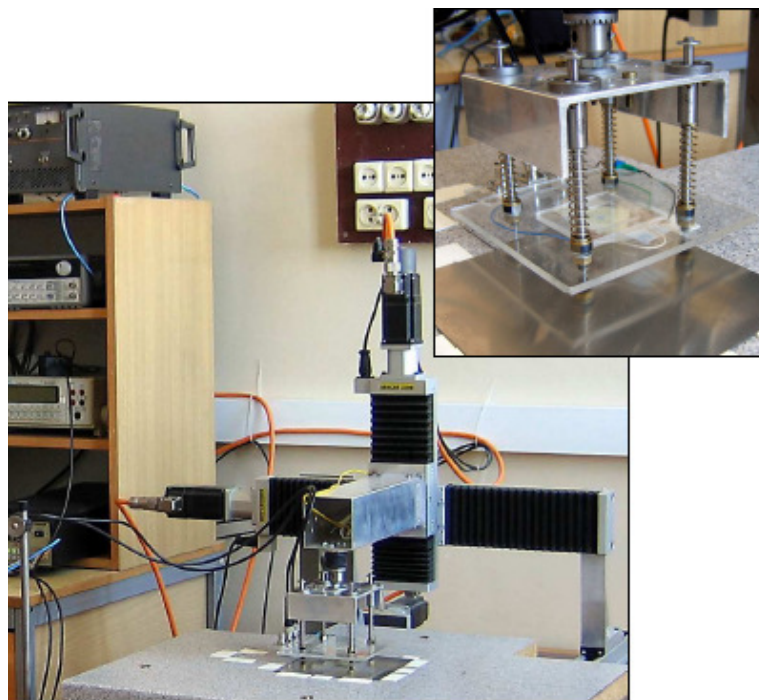


Figura 4.16: Mesa utilizada para fazer as varreduras nas amostras. Em destaque o dispositivo com molas para manter os sensores sob pressão nas amostras. Laboratório de ensaios magnéticos da *West Pomeranian University of Technology*.

Capítulo 5 – Resultados e discussões

5.1 – Introdução

A seguir serão apresentados alguns desenvolvimentos de sondas de correntes parasitas, bem como, os resultados de inspeção dos diferentes sensores propostos. As questões entendidas como pertinentes serão discutidas ao longo do capítulo.

5.2 – Sondas convencionais - Aprimoramento da sonda absoluta

Para a caracterização das amostras fabricadas foram testados alguns arranjos de sondas de correntes parasitas. O primeiro desempenho verificado foi das sondas absolutas devido aos bons resultados encontrados nos trabalhos analisados. Apesar de testes com sondas absolutas já terem sido realizados em trabalhos anteriores, esta etapa pretende desempenhar algumas mudanças na sonda absoluta, visando assim melhorar os resultados das inspeções. Para o aprimoramento, inicialmente, foram analisados os parâmetros da sonda de correntes parasitas utilizada por Rebello [3] para a caracterização do aço duplex, descrita no capítulo três. Verificou-se que, apesar dos bons resultados obtidos pelo autor, alguns aspectos da sonda ainda poderiam ser melhorados.

5.2.1 – Verificação do modelo simulado

Com o objetivo de aprimorar os resultados de inspeção obtidos por Rebello [3], foi utilizado o software COMSOL Multiphysics para modelar sondas de correntes parasitas e assim analisar o seu desempenho nas inspeções. Antes de começar o desenvolvimento de uma nova sonda a partir de simulações, foi necessário verificar se os primeiros modelos simulados por este trabalho representavam bem a realidade. Portanto, a primeira iniciativa nas simulações foi modelar exatamente a mesma sonda utilizada por

Rebello [3] com a finalidade de consolidar as simulações. A figura 5.1 ilustra a comparação entre medidas de fluxo magnético feitas no simulador e medidas realizadas na sonda desenvolvida por Rebello [3] com o auxílio do gaussímetro *AC Milligauss Meter Model UHS*, descrito no capítulo quatro.

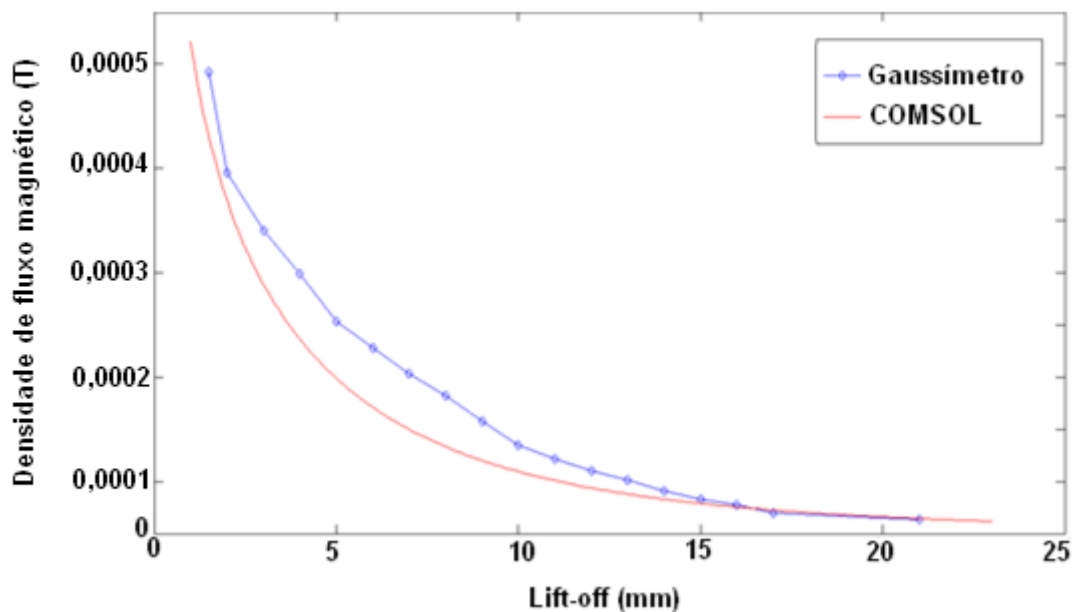


Figura 5.1: Densidade de fluxo magnético em função do *lift-off*. Valores adquiridos com o gaussímetro na sonda desenvolvida por Rebello [3] (em azul) em comparação com o resultado obtido via COMSOL (em vermelho).

A partir da comparação dos resultados da sonda real e do modelo simulado, foi possível constatar que os parâmetros inicializados na sonda simulada estavam condizentes com os da sonda real. Iniciou-se então, a tentativa de aperfeiçoamento da sonda de correntes parasitas utilizado por Rebello [3] a partir das análises dos modelos simulados.

5.2.2 – Aprimoramento da sonda absoluta de correntes parasitas para a inspeção do aço duplex

O primeiro parâmetro ponderado para o aprimoramento foi o núcleo da sonda. A partir de uma análise metalográfica do material que foi utilizado para a composição do núcleo, verificou-se que o aço empregado é hipereutetóide possuindo portanto, uma quantidade de carbono superior a 0,77%. A principal função deste núcleo da sonda, conhecido também como entreferro, é concentrar o fluxo magnético da sonda deixando-a com uma maior sensibilidade [22]. Todavia, esta concentração de fluxo está relacionada com a permeabilidade magnética do intraferro, a qual por sua vez, é inversamente proporcional a porcentagem de carbono [33], figura 5.2.

Contudo, visando aumentar a sensibilidade da sonda de correntes parasitas foi construído um modelo em COMSOL Multiphysics com os mesmos valores de entrada do modelo que representou bem a sonda real, mudando somente as propriedades do intraferro, deixando-o com uma maior permeabilidade magnética a partir de uma simulação empregando um aço com menor percentual de carbono.

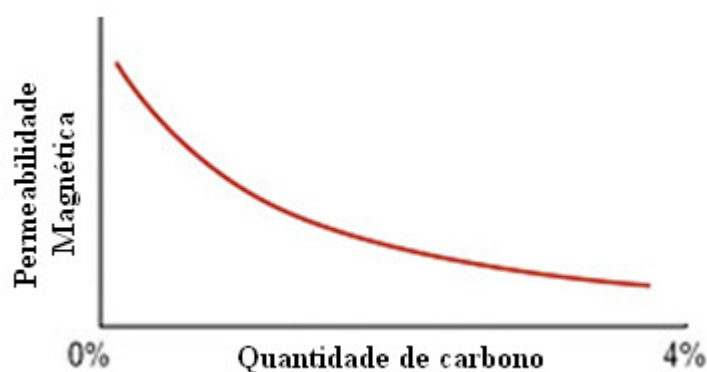


Figura 5.2: Efeito da quantidade de carbono na permeabilidade magnética para aços na temperatura ambiente [33].

A partir da simulação da sonda com o novo núcleo, foi comparada a magnitude do seu fluxo magnético com o modelo que representou bem a sonda real. Na figura 5.3, é

possível visualizar os modelos e a variação do fluxo magnético em cada uma das sondas, assim como, a influência do aumento da permeabilidade do intraferro para a concentração do fluxo magnético. Na região de interface entre a bobina e o núcleo, é possível verificar uma maior concentração de fluxo magnético na sonda que possui o núcleo com maior permeabilidade, figura 5.3B. Vale lembrar que os modelos foram construídos com simetria de eixo, portanto, na figura 5.3 A e B, só é possível visualizar metade da sonda de correntes parasitas.

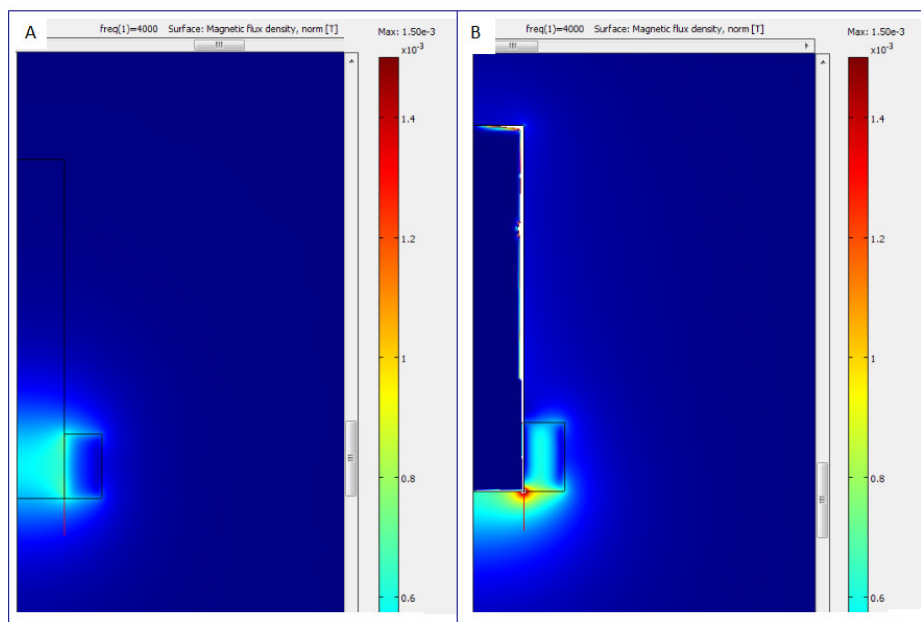


Figura 5.3: Modelo em COMSOL das sondas de correntes parasitas. A: Modelo com intraferro de baixa permeabilidade ($\mu_r = 100$). B: Modelo com intraferro de alta permeabilidade ($\mu_r = 750$).

A figura 5.4, apresenta o gráfico da densidade do fluxo magnético em função do *lift-off* para ambas as sondas. Como pode ser observado, para os dois casos, o fluxo magnético é atenuado à medida que o *lift-off* aumenta, no entanto, próximo à sonda que possui o núcleo com maior permeabilidade é possível mensurar um fluxo magnético consideravelmente maior. Entretanto, este valor é rapidamente suavizado e, a uma distância de aproximadamente 1,5 mm, o valor do fluxo magnético das duas sondas já é semelhante.

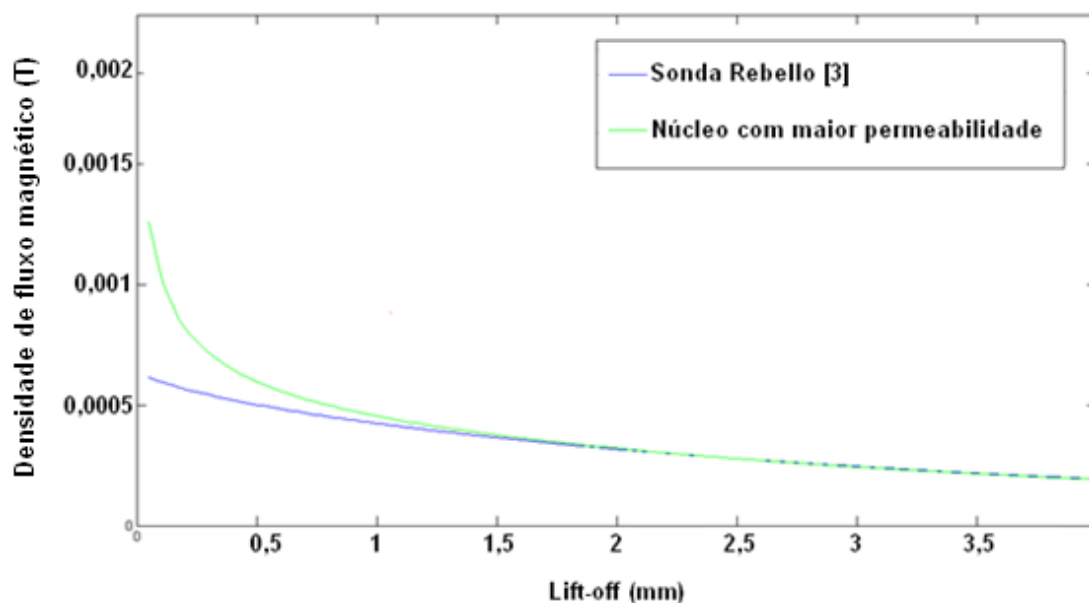


Figura 5.4: Comparação entre as sondas simuladas. A linha azul representa a sonda com o intraferro com alta porcentagem de carbono, ou seja, baixa permeabilidade magnética, enquanto a linha verde representa o núcleo com maior permeabilidade magnética.

Além da alteração da permeabilidade do intraferro da sonda de correntes parasitas, testou-se também a influência da densidade de corrente elétrica aplicada na bobina que compõe a sonda. Sabe-se que um acréscimo na densidade de corrente elétrica faz com que o campo magnético gerado pela bobina e, conseqüentemente, a densidade de fluxo magnético da sonda aumentem. A densidade de corrente da bobina está diretamente ligada à espessura do fio da bobina. Como não serão testadas mudanças na geometria da bobina, a maneira encontrada para aumentar a densidade de corrente foi diminuir a espessura do fio, aumentando assim a quantidade de espiras da bobina e a densidade de corrente elétrica da sonda. O diâmetro do fio utilizado por Rebello [3] foi de 33 AWG (*American Wire Gauge*) ou 0,18mm. Na simulação da sonda aprimorada foi utilizado um fio com um diâmetro de 38 AWG ou 0,10mm. A amplificação da densidade de corrente elétrica após o aumento do número de espiras foi de aproximadamente 40%. Esta densidade de corrente foi aplicada na sonda cujo núcleo já havia sido aprimorado. Os resultados de comparação entre a densidade do fluxo magnético e o *lift-off* estão apresentados na figura 5.5.

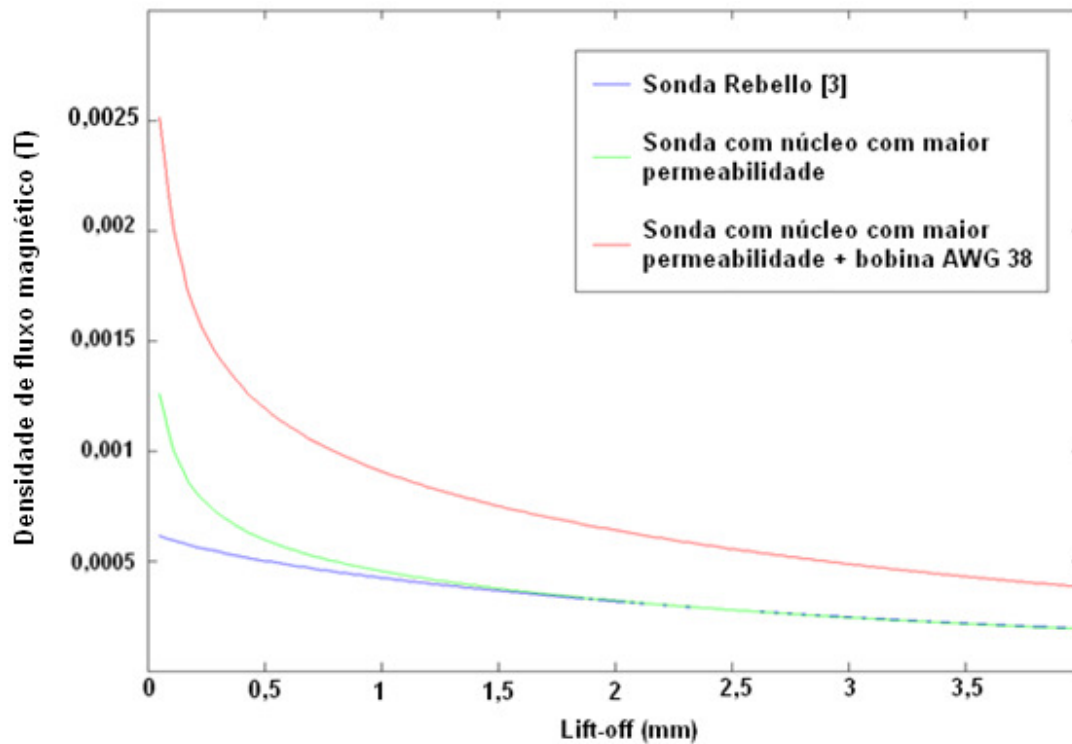


Figura 5.5: Comparação entre os resultados de densidade de fluxo magnético em função do *lift-off*. Em azul: a sonda original de Rebello [3]. Em verde: A sonda com o núcleo com maior permeabilidade magnética ($\mu_r = 750$). Em vermelho: aumento da permeabilidade do intraferro e acréscimo na densidade de corrente da bobina com a diminuição do diâmetro do fio da bobina.

Como pôde ser observado, figura 5.5, a sonda de correntes parasitas aprimorada apresentou um maior fluxo magnético para as mesmas distâncias de *lift-off*. Espera-se que com um maior fluxo, maior seja a densidade de correntes parasitas geradas no material inspecionado fazendo com que a sensibilidade da sonda seja acrescida e finalmente, os resultados de inspeções sejam melhorados. Esta verificação será exposta no item 5.3 deste capítulo.

A partir dos resultados obtidos pela simulação, uma sonda absoluta de correntes foi construída com os seus parâmetros aprimorados. O seu comportamento frente a caracterização do aço inoxidável duplex foi testado e comparado com o desempenho obtido por outras três sondas absolutas.

5.3 – Sondas convencionais - Comparação dos resultados de inspeção com as sondas absolutas em equipamentos comerciais

Quatro sondas absolutas foram testadas e comparadas, sendo duas comerciais (apresentadas no capítulo quatro - item 4.3.1), uma desenvolvida por Rebello [3] (apresentada no capítulo 3 – item 3.4) e uma construída a partir dos resultados de simulação apresentados no item 5.2 deste capítulo. As sondas comerciais foram testadas no equipamento ZETEC MIZ-21B. As demais sondas foram avaliadas com o equipamento OminScan MX ECA. As sondas comerciais tiveram os seus parâmetros de amplitude, fase e ganho, ajustados no equipamento de forma que fosse alcançado o melhor resultado possível frente à caracterização do aço inoxidável duplex. Tratando-se da frequência de operação, estas sondas por apresentarem uma larga banda de frequência de operação também foram ajustadas de maneira que a frequência utilizada foi aquela que apresentou o melhor resultado de caracterização do aço inoxidável duplex. A sonda ZETEC DT 4500 que opera na faixa de 1-5 kHz foi ensaiada na frequência de 4 kHz, enquanto a ZETEC DT 30PS, 50-500 kHz, foi experimentada na frequência de 50 kHz. As sondas desenvolvidas em laboratório, tanto por Rebello [3] quanto por este trabalho, foram ensaiadas nas mesmas condições que o autor estudado alcançou resultados relevantes. A sonda desenvolvida por Rebello [3], foi testada na mesma frequência que o autor utilizou no trabalho divulgado [3], 4 kHz, e, a construída a partir dos resultados de simulação, por ter sido simulada na frequência de 4 kHz, foi testada nesta mesma frequência. A figura 5.6 apresenta os resultados de inspeção das amostras com teores entre 0 e 15% de fase sigma das sondas comerciais, enquanto a figura 5.7 divulga o resultado alcançado com a sonda desenvolvida por Rebello [3] e com a construída a partir dos resultados de simulação.

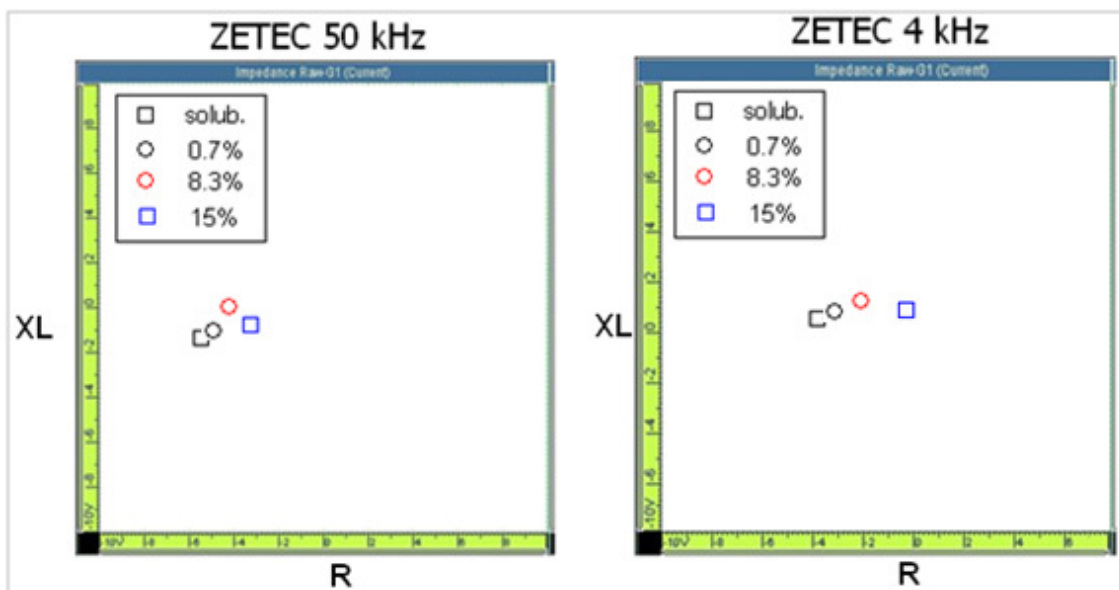


Figura 5.6: Resultado de inspeção com as sondas comerciais.

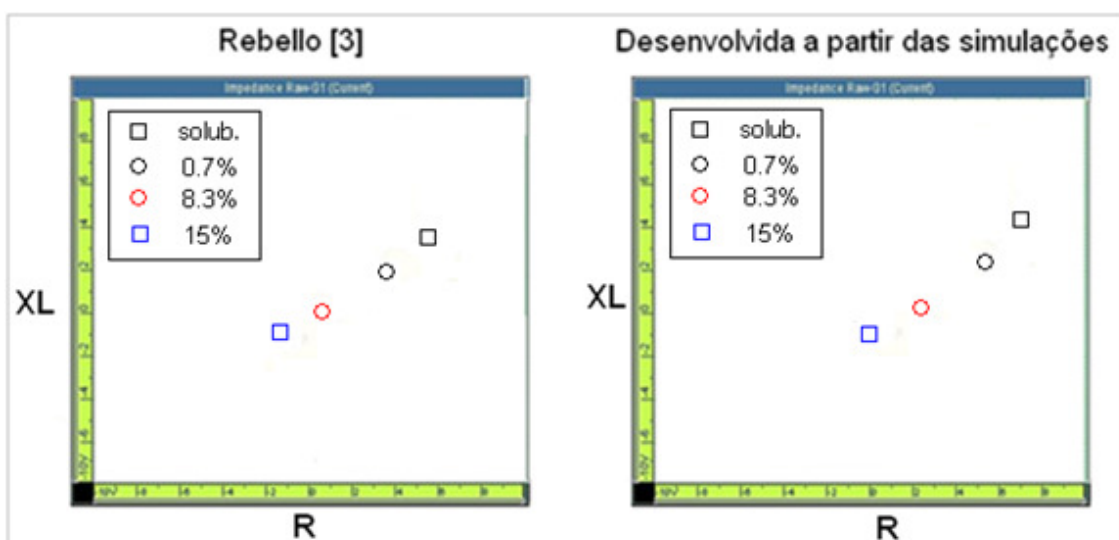


Figura 5.7: Resultado de inspeção com a sonda desenvolvida por Rebello [3] e com a sonda desenvolvida a partir das simulações.

Como pôde ser visto pelas figuras 5.6 e 5.7, para o caso da caracterização dos aços inoxidáveis duplex, os resultados obtidos com as sondas comerciais apresentaram um desempenho inferior na discriminação dos sinais referentes às amostras com diferentes teores de fase sigma. Este acontecimento, provavelmente se deve ao fato das sondas

comerciais serem desenvolvidas em uma larga banda de frequência de operação, visando aumentar a sua versatilidade, enquanto as desenvolvidas em laboratório possuem uma faixa estreita de ressonância, fazendo com a frequência de operação fique mais bem definida. Tratando-se das sondas desenvolvidas em laboratório, o resultado da sonda absoluta otimizada foi bastante parecido com o alcançado pela desenvolvida por Rebello [3] e, em ambos os casos a caracterização ficou bem definida. Realmente esperava-se um resultado melhor com a sonda otimizada, principalmente pela elevada diferença nos resultados de simulação apresentados. Embora seja possível verificar algumas sutis melhorias no resultado de caracterização com a esta nova sonda, principalmente na componente resistiva, o saldo final ficou bastante semelhante ao obtido por Rebello [3].

5.4 – Sondas não convencionais - Inspeção com a sonda Five Legs

Devido ao seu bom histórico perante a detecção de trincas e micro-trincas [35-39], a sonda Five Legs foi a primeira a ser testada diante das amostras de aço inoxidável duplex com fase sigma precipitada. Apesar dos ótimos resultados na detecção de defeitos, esta sonda não apresentou um resultado razoável frente à caracterização do aço inoxidável duplex, figura 5.8. O primeiro ensaio para verificar a capacidade de caracterização da sonda foi feito com a amostra solubilizada e a com 8,3% de fase sigma. Essas amostras foram escolhidas inicialmente devido à grande diferenciação obtida com as sondas absolutas. Embora a Five Legs tenha uma dimensão menor que as sondas absolutas, os resultados alcançados com esta sonda não foram suficientes para diferenciar a amostra solubilizada da com fase sigma precipitada. Como pode ser visto pela figura 5.8, foi feita uma varredura nas amostras em diversas frequências e, na maioria delas os resultados se sobrepunham impossibilitando a distinção das amostras. Operando em frequências acima de 10 kHz foi possível verificar uma diferenciação entre os resultados, no entanto, bastante pequena, e, muito provavelmente originária da baixa penetração no material, aumentando assim o efeito da superfície sobre o sinal. Na figura 5.9 foram destacadas as duas frequências que apresentaram a melhor diferenciação, além disso, nesta mesma figura, foi traçado um círculo englobando os pontos mais distantes de uma mesma varredura. Ao destacar esta área verificou-se que

ambos os resultados estavam sob esta mesma circunferência, comprovando que a distinção entre os resultados obtidos eram menores do que a variação do próprio sinal. Este resultado ilustra a dificuldade de caracterizar o aço inoxidável duplex com a sonda Five Legs.

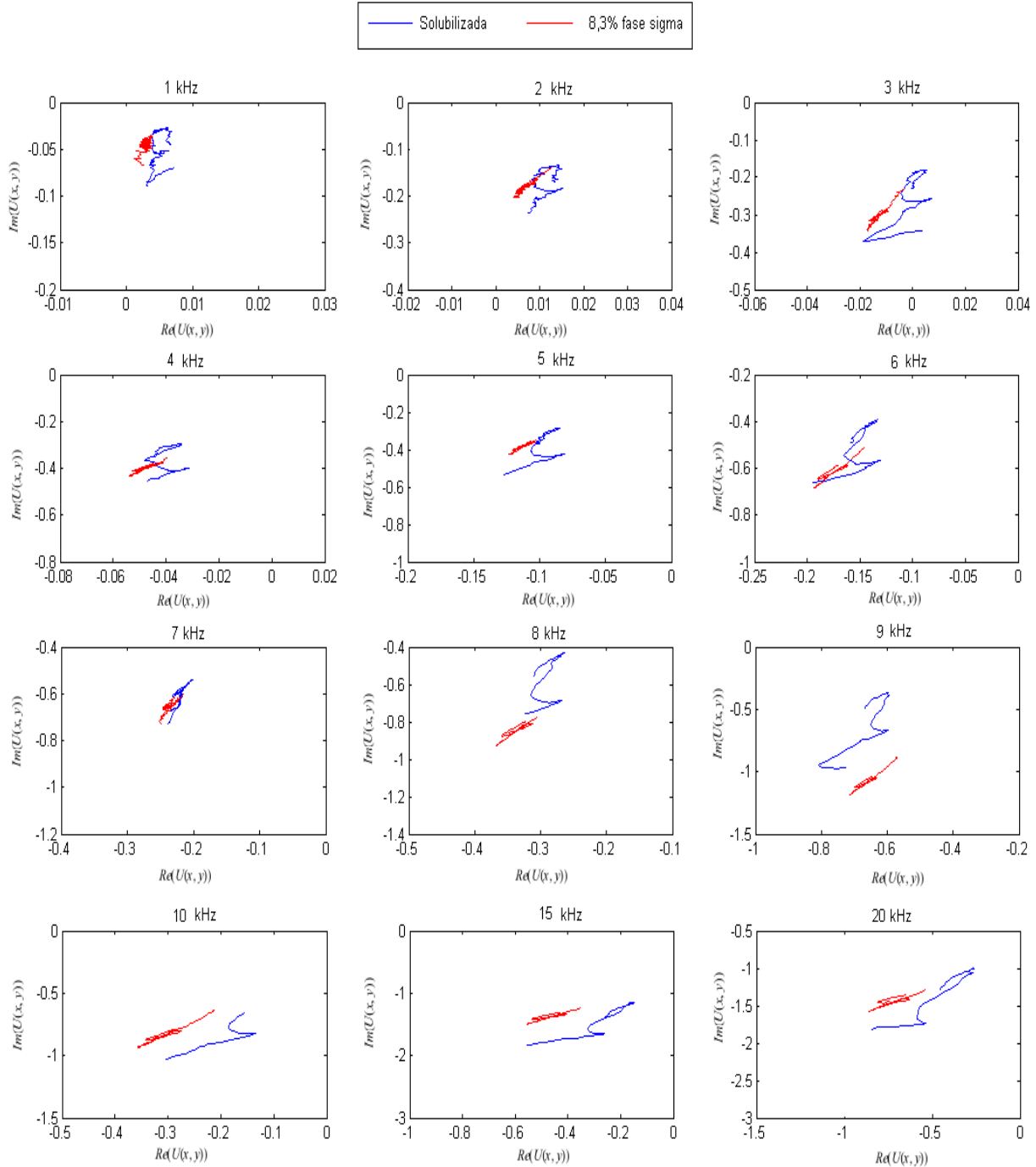


Figura 5.8: Inspeção das amostras um e dois, com 0 e 8,3% de fase sigma precipitada respectivamente. Varredura das amostras muito vezes se sobrepondo, dificultando assim a identificação da amostra com fase sigma precipitada.

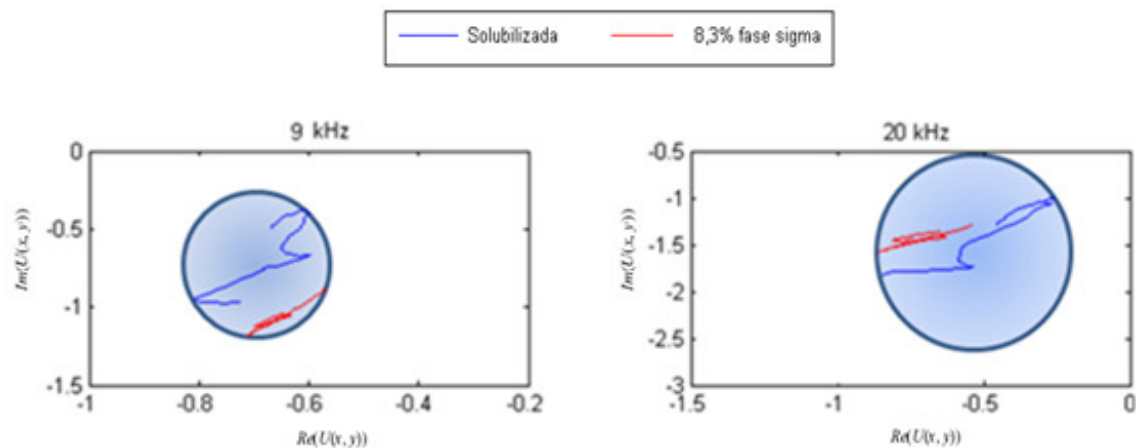


Figura 5.9: As duas frequências que apresentaram o melhor resultado. Em destaque a área envolvendo os pontos mais distantes de uma mesma varredura comprovando a dificuldade de distinguir os resultados de inspeção com a sonda Five Legs.

5.5 – Sondas não convencionais - Inspeções com as sondas TRod1 e TRod2

Com o intuito de aprimorar os resultados de detecção da fase sigma, foram testados outros sensores, no entanto, esses são específicos para caracterização de materiais.

5.5.1 – Resultados sonda TRod1

Como mencionado no capítulo quatro, esta sonda opera com uma amostra de referência e outra que se deseja inspecionar. O sensor possui duas bobinas de recepção localizadas na extremidade do núcleo ferrítico que estão conectadas de forma diferencial, isto é, quando as duas amostras são idênticas o sinal de saída é aproximadamente zero. A figura 5.10 apresenta um desenho da disposição do sensor entre as amostras.

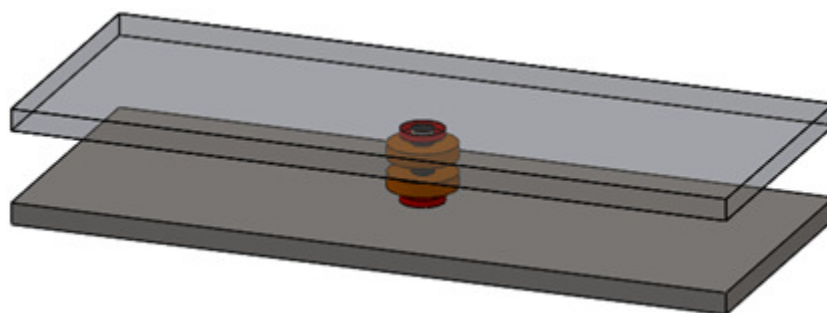


Figura 5.10: Desenho do sensor TRod1.

Inicialmente foi feito o mesmo procedimento utilizado no sensor Five Legs. A amostra solubilizada e a com 8,3% de fase sigma foram comparadas com o intuito de verificar a capacidade do sensor em detectar a presença da fase deletéria. O motivo pelo qual foram utilizadas estas amostras foi a grande diferenciação no plano de impedância obtida com as sondas absolutas testadas. Assim como na sonda Five Legs, duas varreduras foram feitas, sendo uma em cada amostra. Entretanto, os resultados obtidos pela sonda TRod1 foram bastante diferentes. Nesta inspeção, também houve variações nos sinais durante a varredura, porém, neste caso as dispersões foram praticamente insignificantes quando se compara uma varredura com a outra. A figura 5.11 apresenta o plano de impedância com a inspeção das duas amostras e, em destaque é possível ver a variação das varreduras. Como pode ser verificado, o desvio das medidas para este sensor é muito pequeno, por este motivo, será utilizado o valor médio nos seguintes resultados das varreduras. Vale mencionar que este sensor já havia sido utilizado para a caracterização de outros materiais, inonel 600, por exemplo [43]. Por conta disso, os parâmetros do sensor (frequência, corrente elétrica aplicada...) já estavam definidos, fazendo com que para a inspeção do aço inoxidável duplex só fosse preciso fazer alguns pequenos ajustes. A frequência utilizada para o teste foi de 4 kHz e a corrente elétrica aplicada nas bobinas de excitação foi de 100 mA.

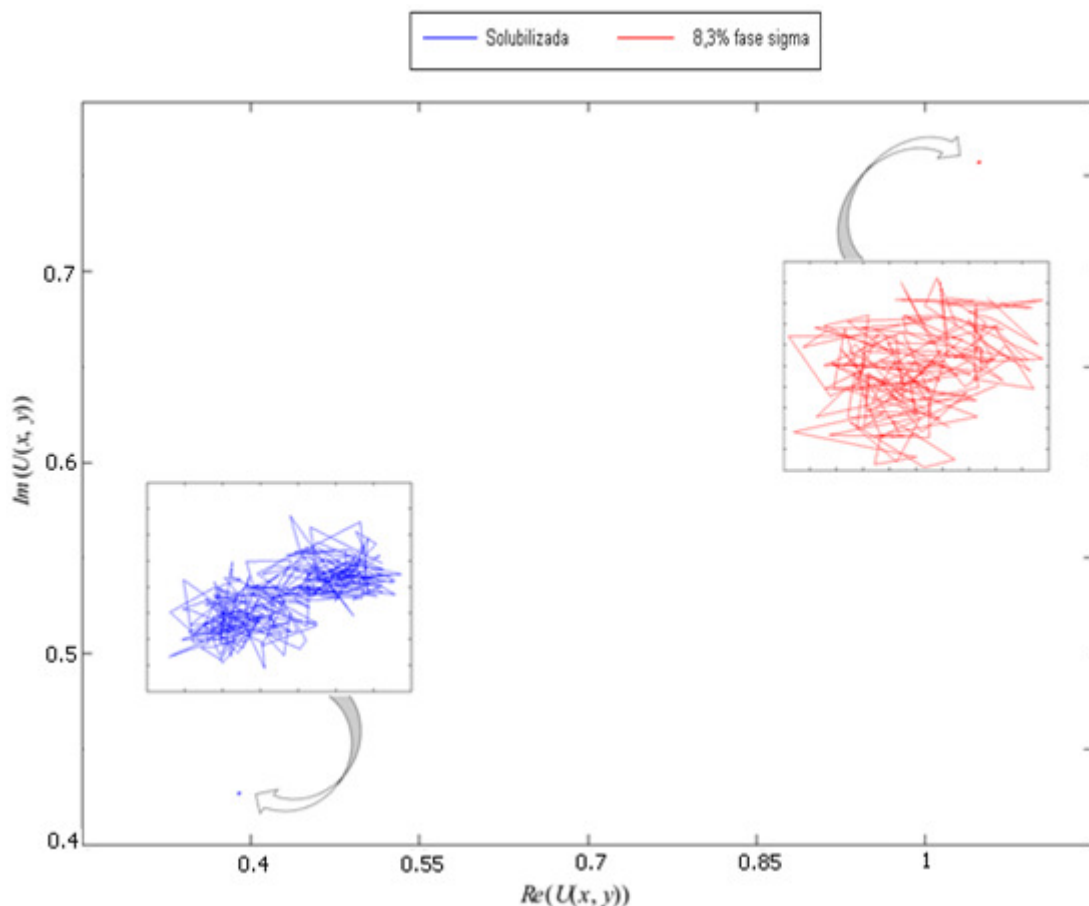


Figura 5.11: Comparação entre os sinais de varredura da amostra solubilizada e da com 8,3% de fase sigma precipitada. Em destaque a pequena variação de ambos os sinais com o sensor TRod1.

A partir dos resultados obtidos com a inspeção das amostras 1b (solubilizada) e 2 (8,3%), verificou-se que tal sensor apresenta um acentuado potencial para caracterização do aço inoxidável duplex perante a identificação da fase sigma. Tendo em vista este resultado, foram inspecionadas as demais amostras com fase sigma, e, como mencionado anteriormente, dado a baixa variação do sinal será utilizado o valor médio de cada varredura nos demais resultados. A figura 5.12 apresenta em um plano de impedância a média das varreduras das amostras com fase sigma precipitada. Os resultados adquiridos foram suficientes para comprovar que a configuração da sonda TRod1 é capaz de discriminar amostras com diferentes teores de fase sigma. Uma observação relevante no resultado é que as variações dos sinais entre as diferentes

quantidades de fase sigma foram basicamente na amplitude do vetor de impedância, a alteração da fase foi consideravelmente pequena.

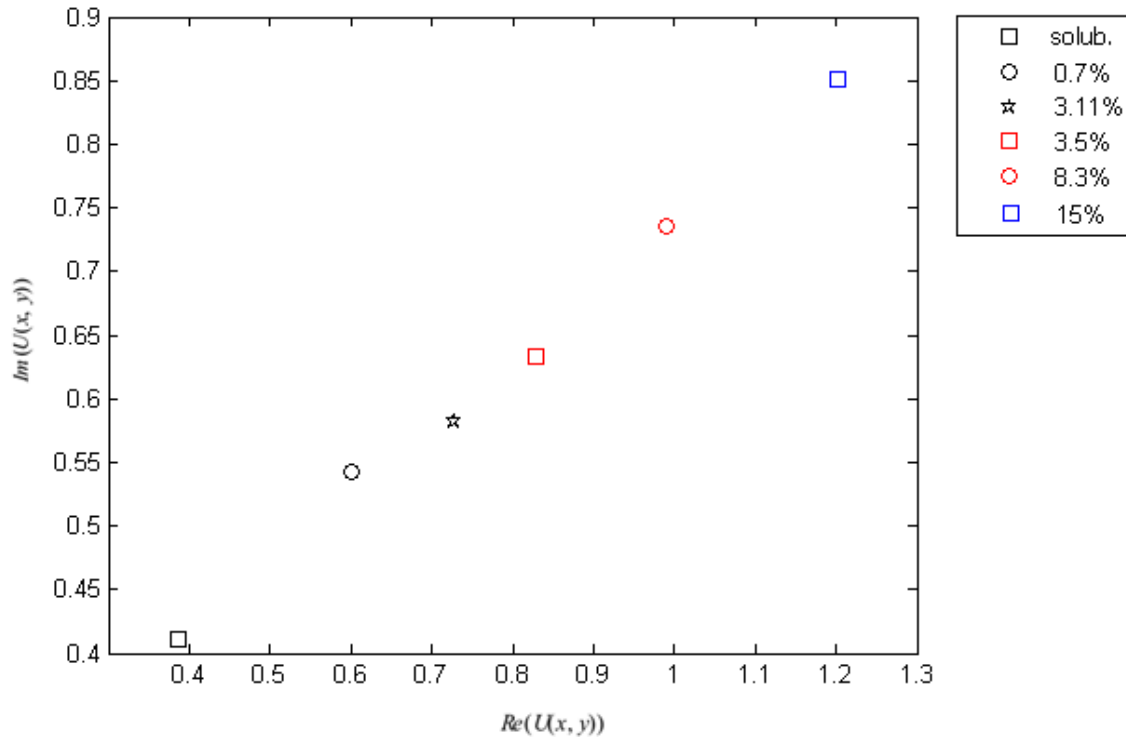


Figura 5.12: Resultado de inspeção das amostras com fase sigma precipitada, sonda TRod1.

5.5.2 – Resultados da sonda TRod2 e comparação com a sonda TRod1

Com o arranjo invertido em relação ao TRod1, a sonda TRod2 possui exatamente o mesmo princípio de funcionamento. O principal objetivo no teste deste sensor é verificar qual das disposições das bobinas é mais eficiente para a identificação da fase sigma. A figura 5.13 apresenta um desenho do sensor entre as amostras.

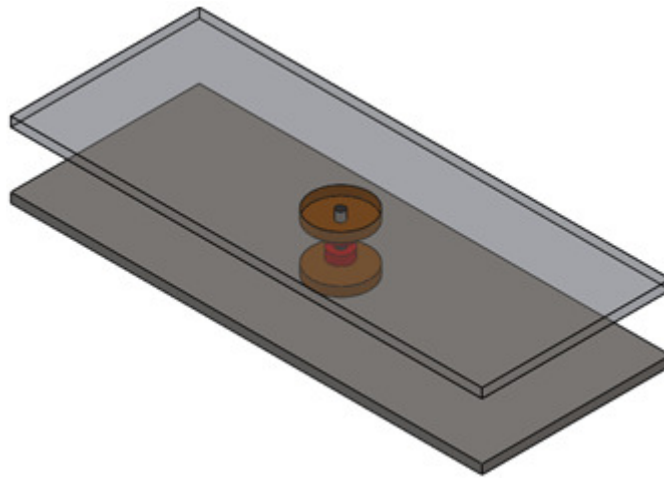


Figura 5.13: Desenho do sensor TRod2.

Os resultados alcançados com o TRod2 também foram suficientes para identificar as diferentes porcentagens de fase sigma precipitada nos aços inoxidáveis duplex, figura 5.14. Comparando estes resultados com os alcançados com o TRod1 é possível verificar algumas semelhanças e diferenças no plano de impedância conseguido com cada um dos sensores. Ambos conseguiram discriminar as amostras com diferentes teores de fase sigma, de forma que, à medida que a quantidade da fase deletéria aumenta, a média do sinal de varredura se distancia cada vez mais do resultado conseguido com a amostra solubilizada. Apesar desta semelhança, o resultado obtido pelo TRod2 apresenta algumas consideráveis vantagens. A disposição das bobinas excitadoras próximas ao material fez com que a diferença nas bobinas receptoras fosse amplificada, resultando em uma maior diferenciação das amostras. Além disso, apesar da amplitude do vetor de impedância também ser a principal variação entre as amostras, nesta sonda em comparação com a TRod1, é possível notar uma variação de fase maior entre a amostra solubilizada e as demais. A figura 5.15 compara as variações de fase entre a amostra solubilizada e as com 0,7% e 15%. Como pode ser verificado a diferença de fase encontrada com o TRod2 foi superior do que a com o TRod1.

Os parâmetros do sensor TRod2 foram exatamente os mesmos utilizados no TRod1. Quatro quilohertz foi a frequência do sinal de excitação das bobinas com uma amplitude de 100 mA.

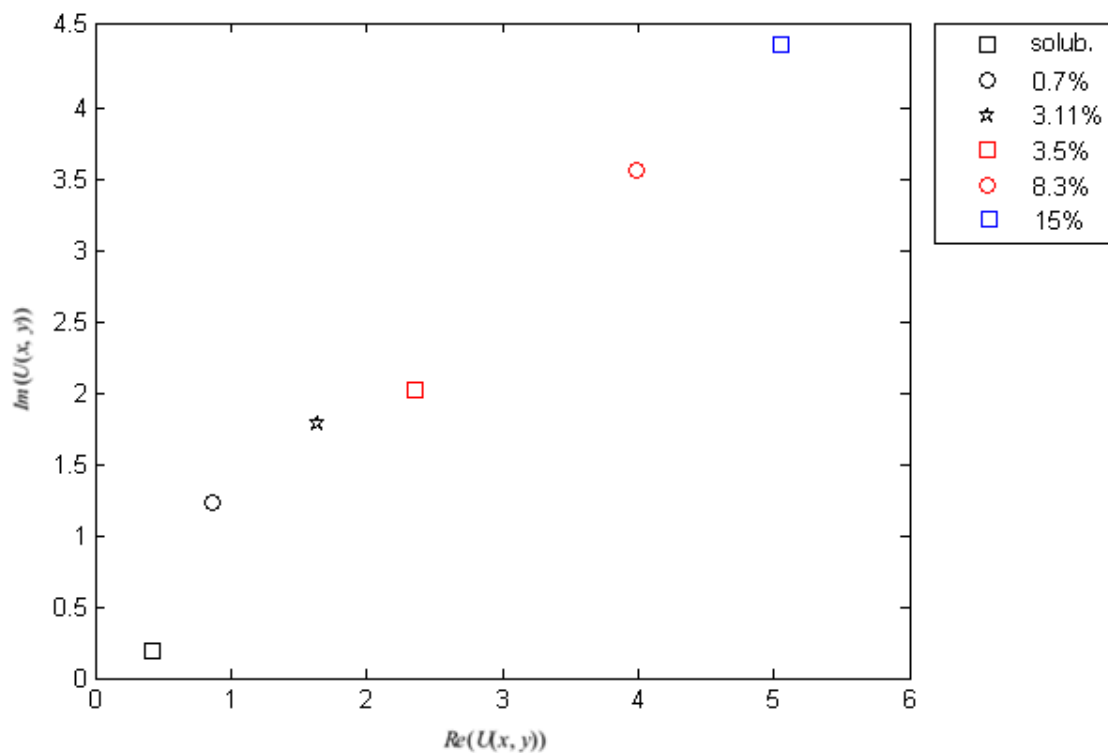


Figura 5.14: Resultado de caracterização do aço inoxidável duplex perante a precipitação de fase sigma com a sonda TRod2.

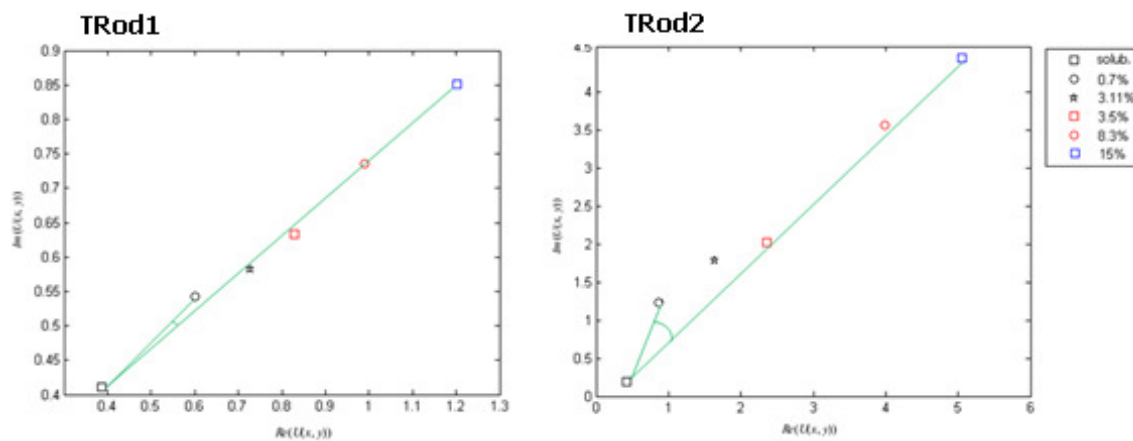


Figura 5.15: Comparação entre a variação de fase obtida com o TRod1 e TRod2. A sonda TRod2 apresenta uma maior variação de fase em relação a TRod1.

Devido ao bom desempenho do sensor TRod2, foram inspecionadas as demais amostras fabricadas, com o objetivo de identificar as diferentes quantidades de ferrita e austenita.

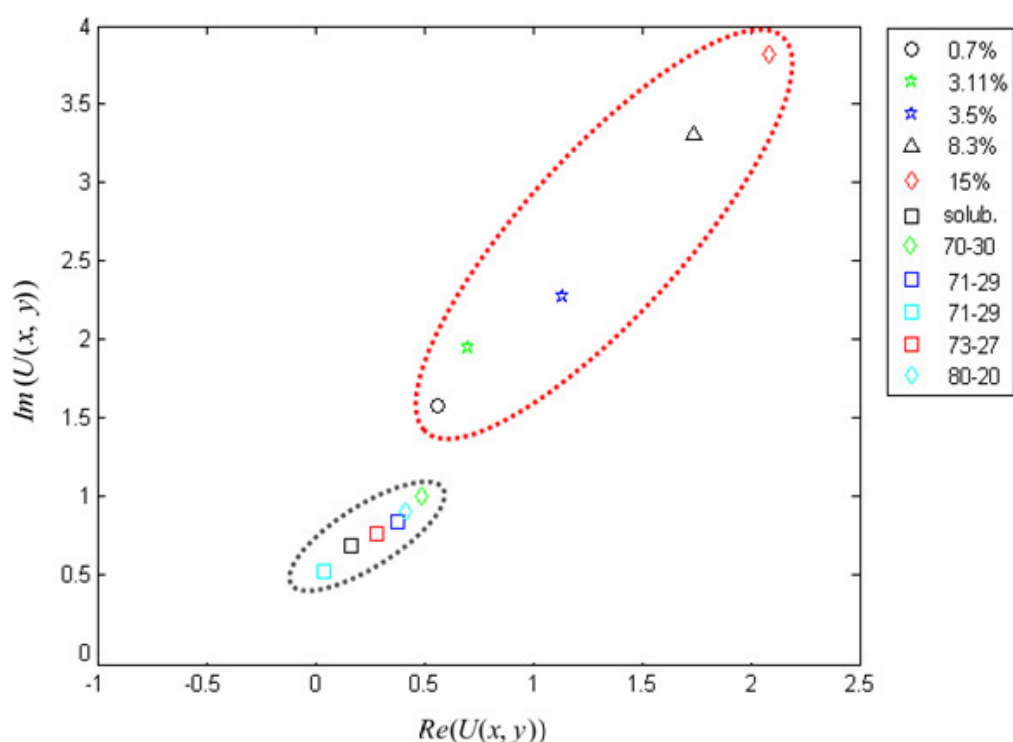


Figura 5.16: Inspeção de todas as amostras fabricadas com o sensor TRod2. Em destaque as amostras com fase sigma (elipse vermelha) e as amostras com desbalanceamento microestrutural (elipse preta).

A figura 5.16 apresenta o plano de impedância complexo com o resultado de inspeção de todas as amostras fabricadas. As amostras com fase sigma, como visto anteriormente, possuem uma grande diferenciação entre si, além de serem facilmente distinguidas da amostra solubilizada. Entretanto, para as amostras com microestrutura desbalanceada, não foi possível diferenciá-las de acordo com o teor de ferrita e austenita. Tratando-se das amostras com desbalanceamento, apesar de existir uma variação entre o valor médio da varredura feita nestas amostras, não foi encontrado nenhuma relação da variação dos resultados com a porcentagem de alguma das fases. Por exemplo, a amostra com oitenta por cento de ferrita e vinte por cento de austenita (amostra #04, 80-20 - losango azul claro na figura 5.16) está bem próxima, quase sobreposta, da amostra com setenta e um por cento de ferrita (amostra #23, 71-29 - quadrado azul escuro), no entanto, outra amostra com os mesmos setenta e um por cento (amostra #22, 71-29 – quadrado azul claro) já está bem distante da #04 e #23. Considerou-se portanto, que esta variação

encontrada nas amostras com desbalanceamento seria devido à superfície irregular de tais amostras. Como a temperatura do tratamento térmico para produzir tais desbalanceamentos é muito elevada (1300 °C), as peças após saírem da têmpera apresentam certo empenamento, figura 5.17. Acredita-se que esta irregularidade da superfície surte um efeito durante a varredura, dificultando o contato do sensor com a amostra e fazendo com que haja variação nos valores médios das varreduras.



Figura 5.17: Foto da amostra #04, com 80% de ferrita e 20% de austenita.
Empenamento devido ao tratamento térmico.

Esta dificuldade de inspecionar amostras do aço inoxidável duplex com diferentes porcentagens de ferrita e austenita comprova o resultado obtido por Rebello [31]. Como sugerido pelo mesmo autor, para discriminar tais anomalias é preciso trabalhar com campos magnéticos elevados, próximo ao patamar de saturação do material. No caso dos sensores de correntes parasitas o campo magnético é considerado baixo para tal diferenciação. A figura 5.18 apresenta uma foto do sensor durante a varredura. O suporte utilizado possui um sistema de molas para manter o sensor sempre em contato com a amostra e assim diminuir o efeito de *lift-off*.

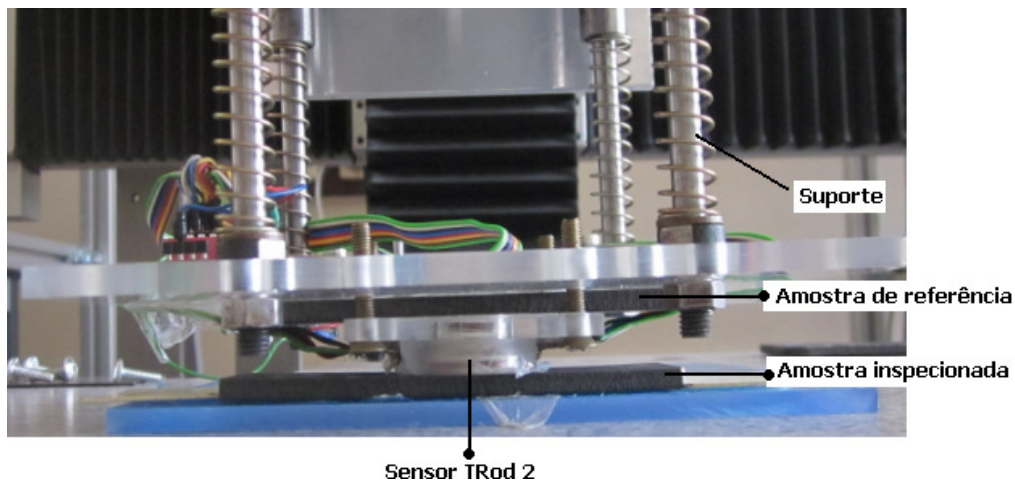


Figura 5.18: Foto do sensor TRod2 durante a varredura.

5.6 – Resultados sonda Double ‘C’ Core

Com o intuito de verificar a eficácia de sondas que trabalhem com o circuito magnético fechado, foi testado o sensor Double ‘C’ Core. Possuindo uma única bobina de excitação e duas de recepção do sinal, o sensor recebe este nome pois é construído a partir de dois núcleos ferríticos em formato de ‘C’. A figura 5.19 apresenta um desenho do sensor entre as amostras.

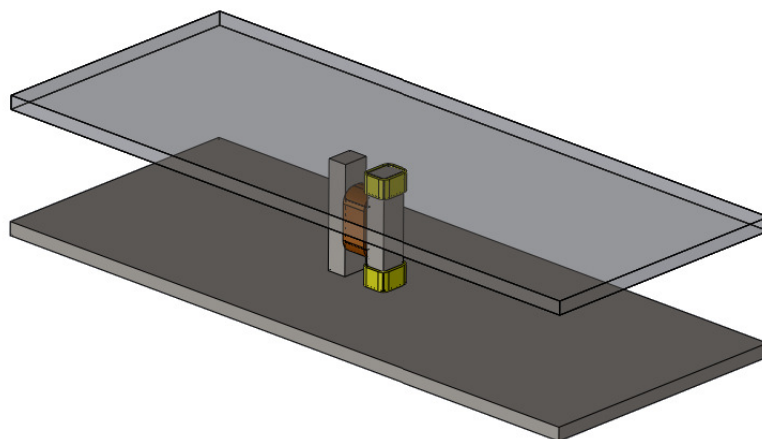


Figura 5.19: Desenho da sonda Double ‘C’ Core.

Com tal sonda, também foi possível discriminar a amostra sem das com fase sigma precipitada, entretanto, o saldo alcançado não foi tão expressivo quanto o obtido com as sondas TRod1 e TRod2. O plano de impedância apresentado pela figura 5.20 exibe o resultado de inspeção da sonda em questão, e, como é possível analisar, a diferenciação das amostras com 3,11% e 3,5% praticamente não existiu com este sensor. Apesar dessa pequena diferenciação entre as amostras com 3,11% e 3,5% de fase sigma, com este sensor verificou-se uma grande diferenciação entre a amostra solubilizada e a com 0,7% de fase sigma, indicando que para identificar pequenos teores da fase deletéria esta configuração pode ser bastante adequada. Vale destacar que para este sensor a corrente elétrica aplicada na bobina de excitação foi de 40 mA, aproximadamente duas vezes e meia menor que nos demais sensores testados. Apesar desta baixa corrente, o resultado obtido com o sensor Double 'C' Core, principalmente em relação a componente real, foi cerca de quatro vezes maior do que com os demais sensores. Embora as bobinas de excitação e de recepção sejam capaz de suportar uma corrente de até 150 mA. Para as bobinas do Double 'C' Core foi preciso aplicar uma baixa corrente de excitação devido às limitações do equipamento. Como a amplitude do sinal de saída da sonda com circuito fechado é alta, se operasse, por exemplo, com 100 mA (mesma corrente utilizada nos sensores TRod1 e 2) o sinal de diferença das bobinas receptoras saturaria o amplificador *Lock-In*.

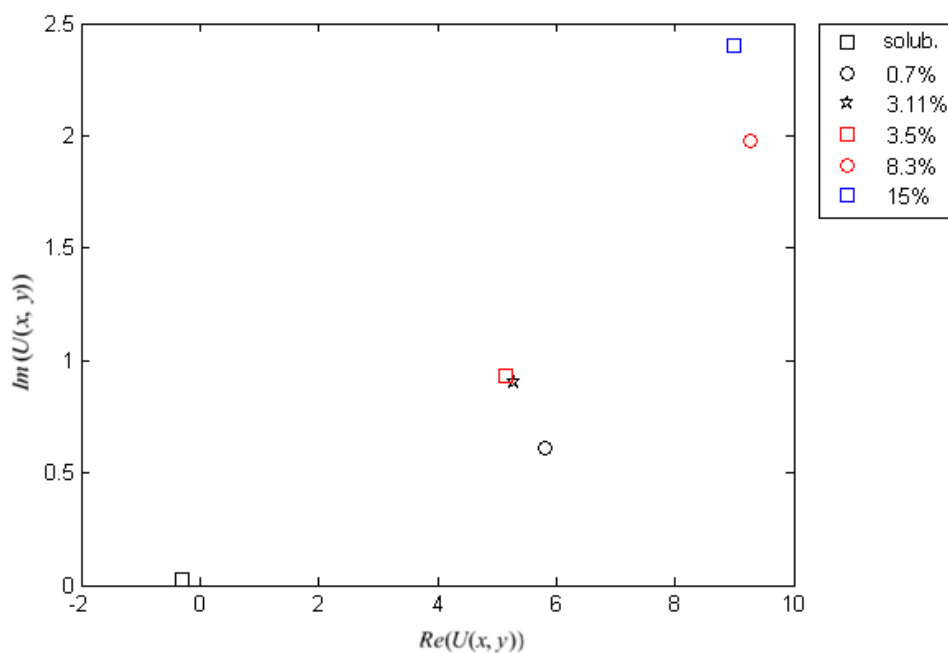


Figura 5.20: Resultado de caracterização do aço inoxidável duplex perante a precipitação de fase sigma com a sonda Double 'C' Core.

5.7 – Comparação entre as inspeções com circuito magnético aberto e fechado

A diferença entre a variação da componente real alcançada nos resultados apresentados ilustra bem a diferença entre os sensores com circuito magnético aberto e fechado. Mesmo com uma menor quantidade de corrente elétrica aplicada, a sonda que opera com o circuito fechado mostrou um bom resultado em termos de amplitude do sinal. Esse resultado já era esperado, pois como comentado no capítulo quatro, o circuito magnético fechado aumenta a sensibilidade da sonda pelo fato do fluxo magnético estar confinado durante toda a sua excursão. Para visualizar esta diferença de forma mais clara foram feitas simulações com o software COMSOL Multiphysics de ambos os sensores. Para a simulação do sensor TRod2 foi utilizado uma densidade de corrente elétrica correspondente aos 100 mA e, para o Double ‘C’ Core uma proporcional aos 40 mA. As figuras 5.21 e 5.22 apresentam os dois resultados da simulação com a densidade corrente induzida (A/m^2) gerada em cada uma das configurações. Na 5.21 é possível visualizar a sonda TRod2 e, como as bobinas excitadoras possuem a polaridade invertida, as correntes induzidas possuem sinais contrários. A figura 5.22 apresenta a Double ‘C’ Core, correntes induzidas com o mesmo sinal.

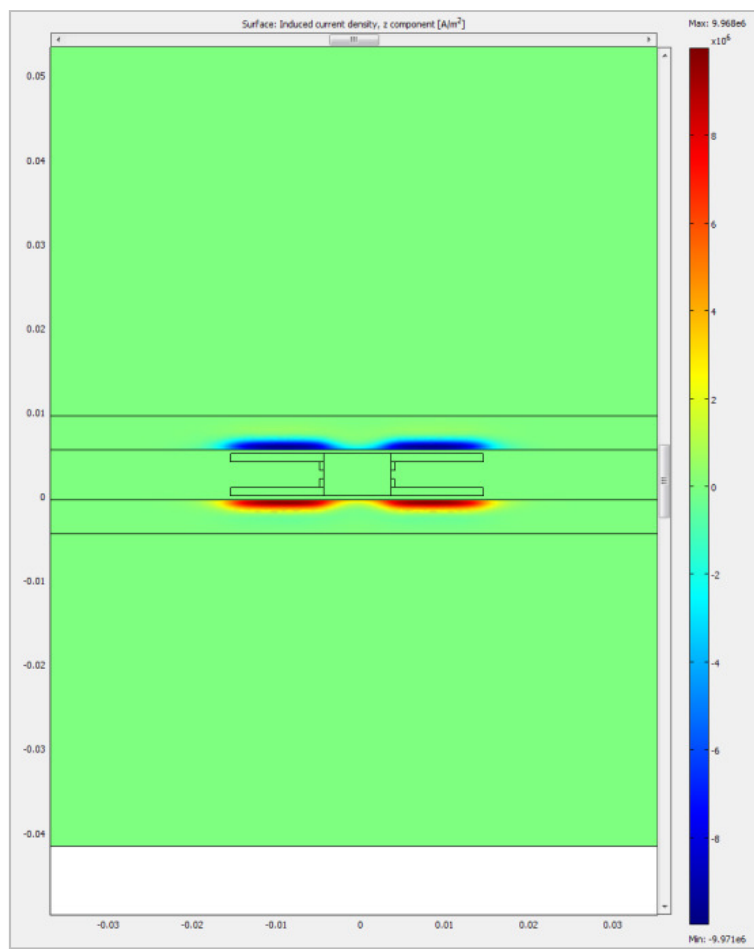


Figura 5.21: Simulação da sonda TRod2. Resultado das correntes induzidas geradas no aço inoxidável duplex.

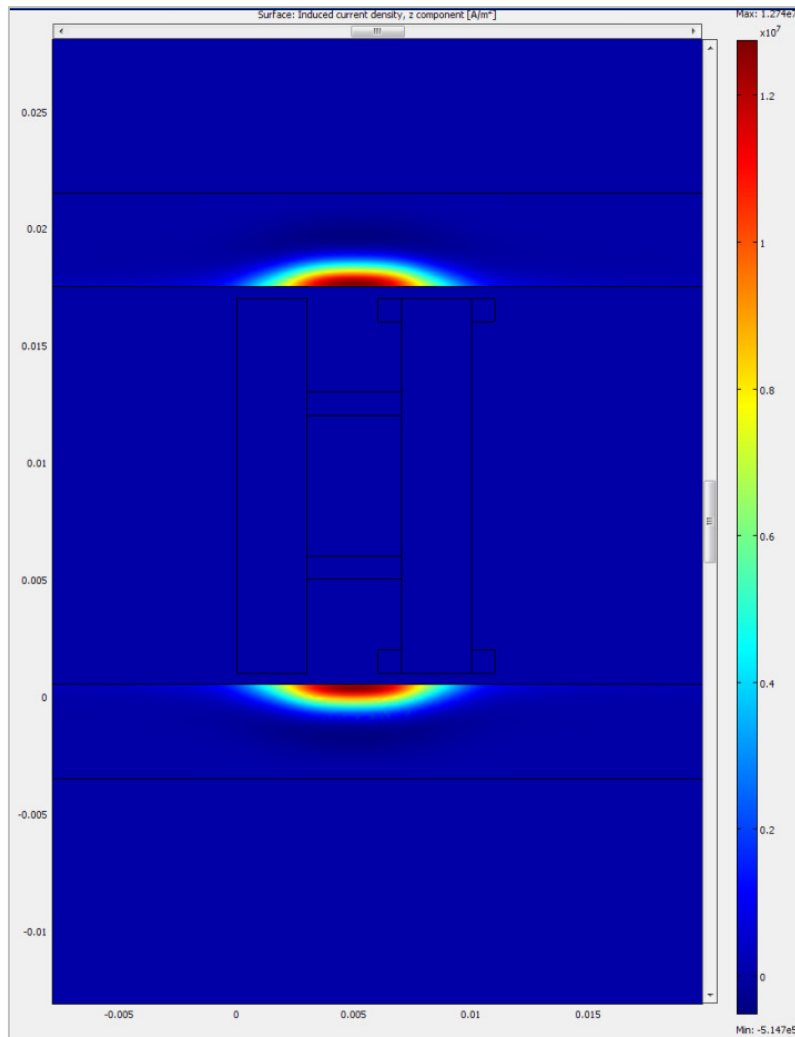


Figura 5.22: Simulação da sonda Double ‘C’ Core. Resultado das correntes induzidas geradas no aço inoxidável duplex.

Com o objetivo de visualizar a diferença entre a energia transmitida por cada um dos circuitos magnéticos e assim poder compará-los, foi traçado um perfil no interior do material para verificar a densidade de corrente induzida gerada por cada um dos sensores. A linha vertical vermelha presente na figura 5.23 ‘A’ e ‘B’ ilustra a seção na qual será analisado tal parâmetro.

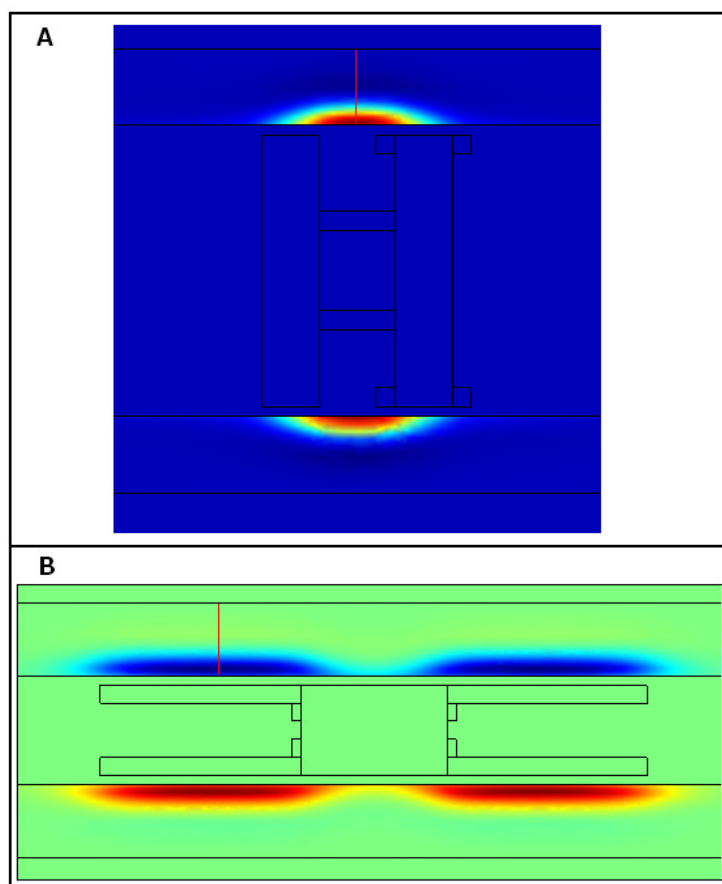


Figura 5.23: Sensores com cada uma das regiões que serão analisadas. A) Circuito magnético fechado. B) Circuito magnético aberto.

Os gráficos das figuras 5.24 e 5.25 representam as seções destacadas na figura 5.3 ‘A’ e ‘B’, respectivamente, e relacionam a densidade de corrente induzida com a profundidade de penetração. Como pode ser verificado, a máxima densidade de corrente induzida apresentada pelo circuito fechado é aproximadamente $1,3 \cdot 10^7$ A/m², enquanto que, no circuito aberto o pico está em torno de $1,0 \cdot 10^7$ A/m². Além disso, a profundidade de penetração das corrente induzidas é consideravelmente maior no circuito magnético fechado. Por exemplo, a uma profundidade de 1,5 milímetros a densidade apresentada por este circuito é aproximadamente $0,4 \cdot 10^7$ A/m², e, a alcançada pelo aberto é em torno de $0,1 \cdot 10^7$ A/m². Cerca de quatro vezes menor. Esse resultado comprova que a sonda Double ‘C’ Core, mesmo com uma corrente aplicada menor apresenta uma densidade de correntes parasitas maior. Este resultado justifica a utilização do circuito magnético fechado para a detecção de trincas mais profundas.

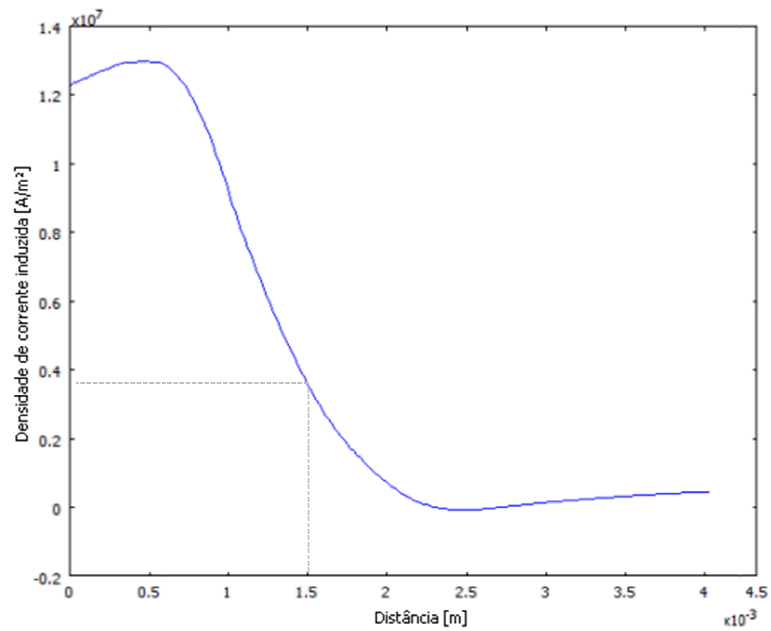


Figura 5.24: Perfil de densidade de corrente induzida gerado pelo circuito magnético fechado (Double ‘C’ Core). Em destaque é possível visualizar o valor da densidade de corrente induzida para uma distância (profundidade) de 1,5 mm.

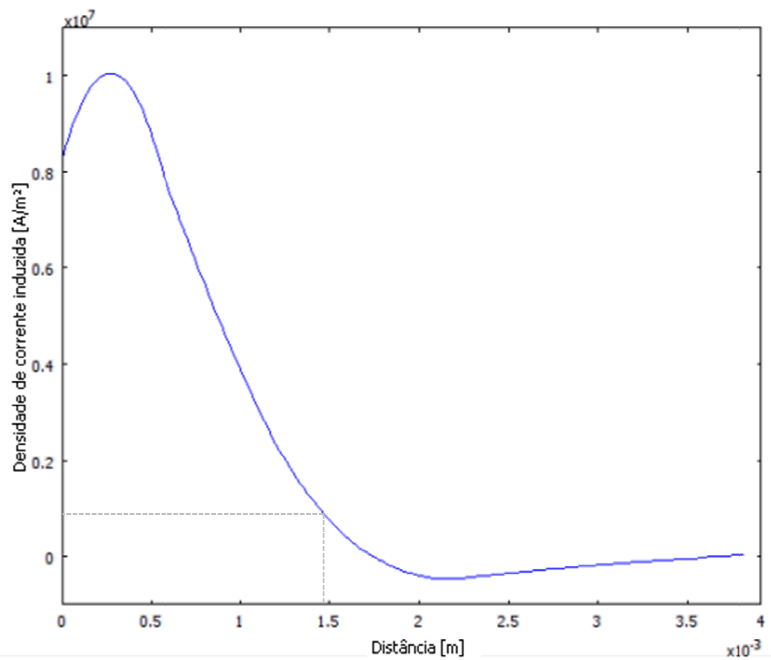


Figura 5.25: Perfil de densidade de corrente induzida gerado pelo circuito magnético aberto (TRod2). Em destaque é possível visualizar o valor da densidade de corrente induzida para uma distância (profundidade) de 1,5 mm.

A figura 5.26 apresenta o resultado da simulação com as linhas de fluxo magnético de cada um dos sensores. As linhas de fluxo da sonda Double 'C' Core praticamente confinadas, enquanto as da TRod2 com uma grande excursão pelo ar.

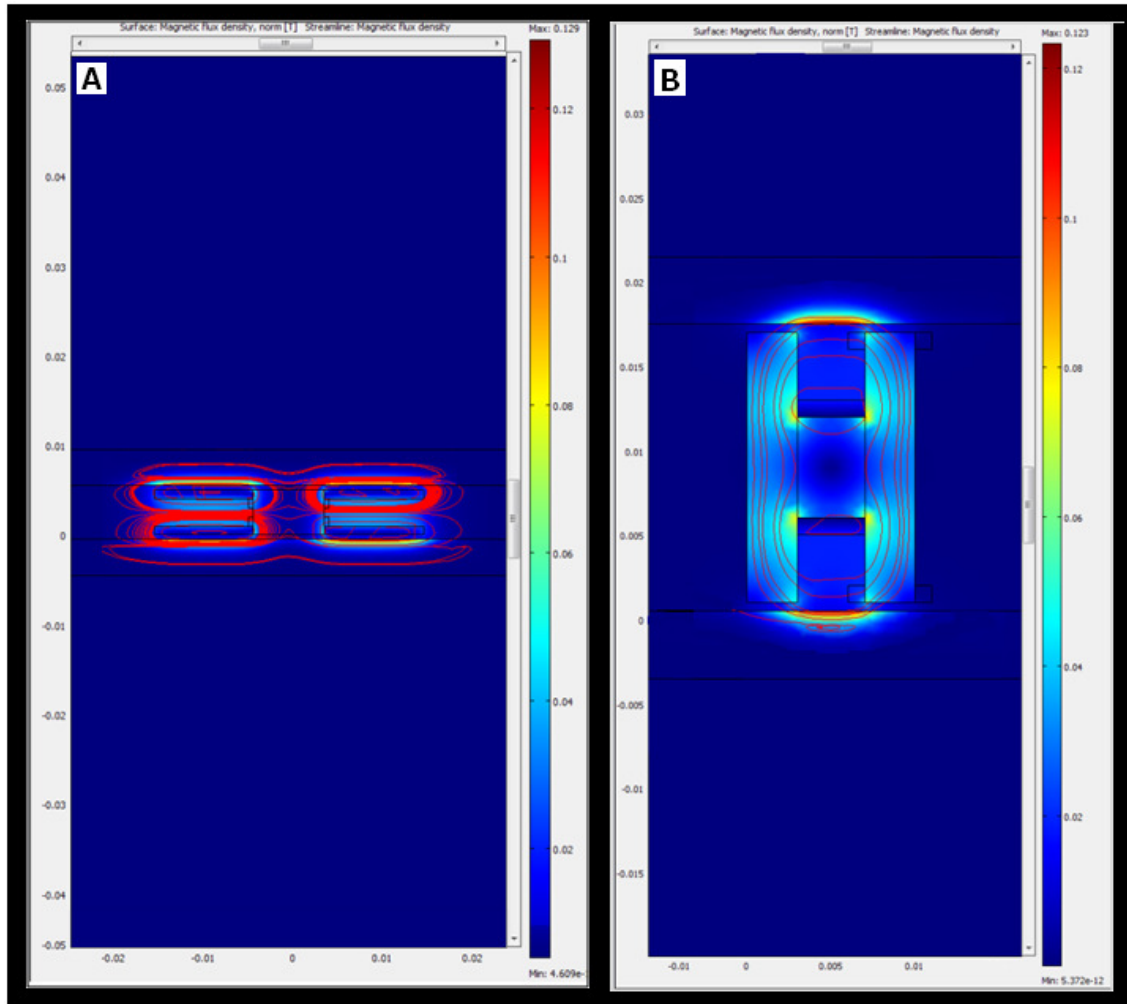


Figura 5.26: Comparação entre a excursão dos fluxos magnéticos de cada um dos sensores.

5.8 – Desenvolvimento de sondas para inspeção das ZTAs

Apesar dos bons resultados obtidos com os sensores apresentados, nenhum deles é capaz de inspecionar as zonas termicamente afetadas (ZTAs) devido exclusivamente às suas grandes dimensões. Estas zonas podem chegar a apresentar poucos milímetros de largura, e dependem exclusivamente das condições de soldagem do material. Como em situações reais (“de campo”) a precipitação de fase sigma ocorre geralmente em tais regiões, é de suma importância que se desenvolva um sensor que seja capaz de identificar a sua presença em tais zonas. A figura 5.27 apresenta uma foto de uma junta soldada do aço inoxidável duplex com uma das ZTAs em destaque.

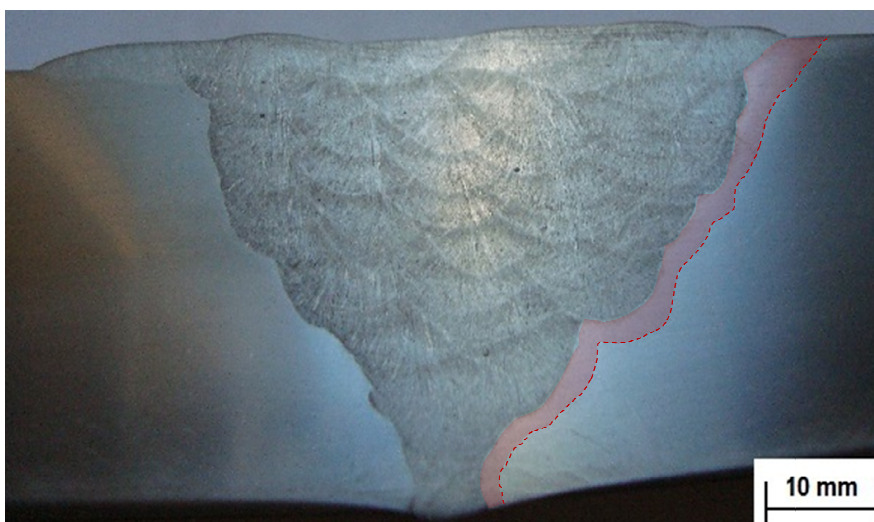


Figura 5.27: Foto de uma junta soldada do aço inoxidável duplex. Em destaque uma das ZTAs com aproximadamente dois milímetros de largura.

O objetivo desta seção é apresentar o desenvolvimento de sensores em escalas reduzidas de forma que sejam capazes de inspecionar as ZTAs. Para a seleção da configuração utilizada em tais sondas foi utilizado os resultados apresentados anteriormente. Pelo fato da sonda TRod2 ter apresentado um resultado melhor que a TRod1 (tanto em variação de fase quanto em amplitude) foi escolhido este arranjo para estudo e desenvolvimento da sonda em escala reduzida. Contudo, como a sonda para a inspeção da ZTA precisa ser bem pequena, acarretando assim em uma redução da densidade de correntes

parasitas, e, conseqüentemente da sensibilidade da sonda, pretende-se, visando contornar este problema, aumentar a frequência de excitação da sonda. Além disso, pretende-se desenvolver um outro sensor (também em escala reduzida) com a configuração do Double 'C' Core devido à vantagem apresentada pelo circuito magnético fechado de concentrar o fluxo magnético fazendo com que a sensibilidade da sonda aumente. Para o desenvolvimento da sonda TRod2 com dimensões menores, serão feitas algumas simulações visando otimizar o sensor e assim obter a melhor resposta possível frente a identificação da fase sigma precipitada nas zonas termicamente afetadas do aço inoxidável duplex. Tratando-se da Double 'C' Core, como o seu núcleo ferrítico (formato de ferradura) não é comercialmente fácil de ser encontrado, não foram feitas simulações para determinar a melhor dimensão do núcleo a ser utilizado, e sim, foi procurado no mercado o menor tamanho de núcleo, para que fosse possível inspecionar as ZTAs com tal configuração. A sonda TRod2, por apresentar um núcleo ferrítico no formato de um cilindro, diversas variações de diâmetro e comprimento são facilmente encontradas/fabricadas.

5.8.1- Simulações para a otimização da sonda TRod2

Durante o processo de simulação foi seguido o mesmo princípio do início dos experimentos com as sondas não convencionais. A amostra solubilizada e a com 8,3% de fase sigma precipitada foram comparadas no modelo simulado em COMSOL Multiphysics, visando assim verificar a capacidade de diferenciação de tais amostras. O motivo para utilizar estas amostras foi o mesmo apresentado anteriormente - grande diferenciação obtida com as sondas absolutas.

Com o intuito de aperfeiçoar a sonda TRod2 para a inspeção de ZTAs, foram variados os parâmetros de geometria da sonda julgados como os mais influentes para a caracterização do material. A listagem abaixo apresenta os parâmetros que serão variados, com os seus respectivos intervalos, e, os fixos com os seus valores.

Parâmetros variados:

Diâmetro da sonda (d): 3 e 5 mm.

Altura das bobinas de excitação (h): 1, 2, 3, 4 e 5 mm.

Comprimento da sonda/altura do núcleo ferrítico (H): 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20 mm.

Parâmetros fixos:

Distância entre as bobinas de excitação e as amostras (*lift-off*): 1 mm.

Diâmetro do núcleo ferrítico: 1,8 mm.

Comprimento das bobinas de recepção: 1 mm.

Largura das bobinas de recepção: 1 mm.

A figura 5.28 apresenta um esquemático da sonda TRod2 com as dimensões fixas e as que irão variar durante o processo de otimização.

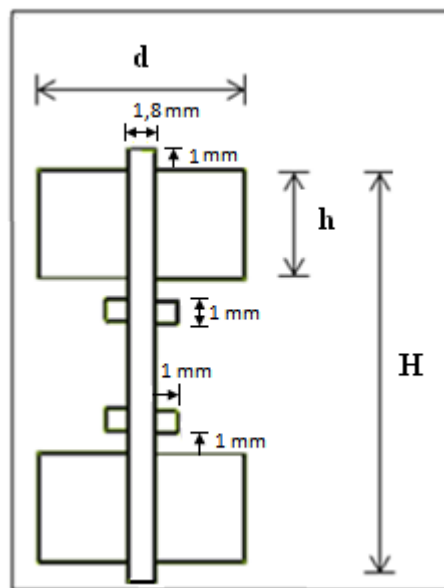


Figura 5.28: Sonda TRod2 com as dimensões fixas e as que irão variar durante o processo de otimização. As dimensões que estão cotadas serão fixas.

Entre os parâmetros que serão variados, vale destacar que a altura máxima do núcleo ferrítico que será simulada é de 20 milímetros devido às propriedades mecânicas da ferrita, alta fragilidade. Como o diâmetro do núcleo é fixo (1,8 mm), não serão

simulados tamanhos maiores do que 20 milímetros devido às dificuldades práticas de manuseio de núcleos de ferrita longos e esguios.

Sendo a sonda TRod2 simétrica, as simulações puderam ser feitas em modelos com simetria de eixo (*axisymmetric*), o que facilitou bastante a otimização em termos de energia computacional. Como dezenas de geometrias serão geradas e comparadas em um mesmo código, é preciso fazer um balanceamento entre a rapidez para o cálculo de cada uma dessas geometrias e a precisão dos resultados. Em um modelo com simetria de eixo, por só contemplar metade do desenho, o cálculo é consideravelmente mais veloz, fazendo com que a malha de elementos finitos possa ser mais refinada nas regiões mais relevantes, e com isso aumente a precisão dos resultados. A figura 5.29 apresenta uma das geometrias analisadas com a malha refinada na região de interesse. A figura 5.30 ilustra dois resultados de correntes induzidas geradas por duas geometrias diferentes. Nesta figura 5.30 é possível verificar as diferenças entre o tamanho das bobinas de excitação e a sua influência na densidade de correntes parasitas induzidas.

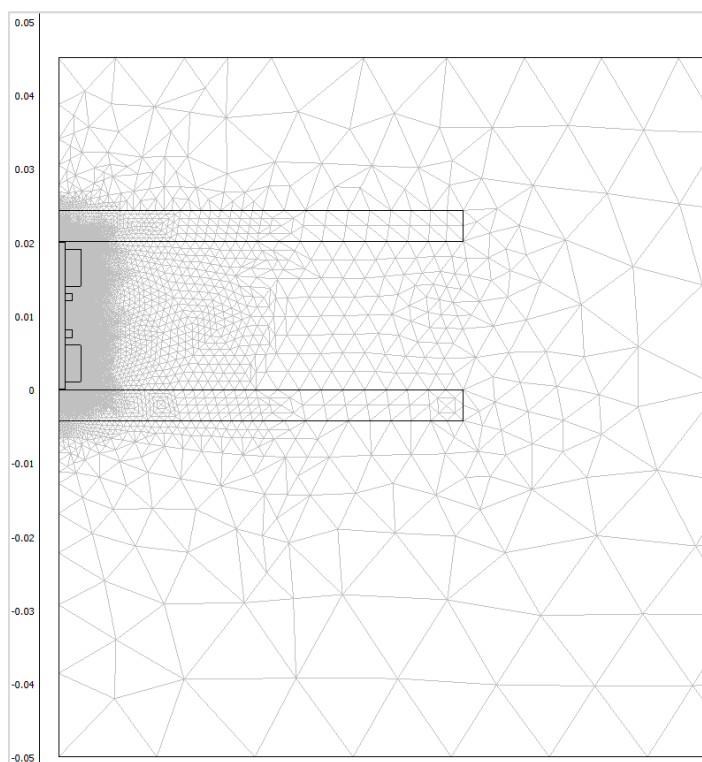


Figura 5.29: Malha de elementos finitos gerada em uma das geometrias simuladas.

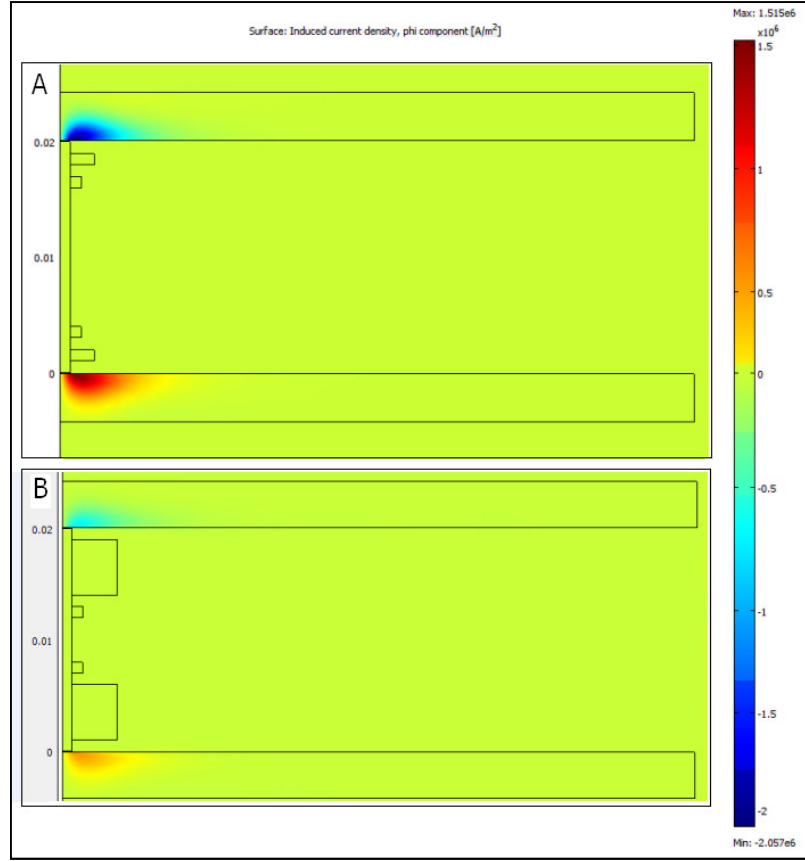


Figura 5.30: Correntes induzidas de dois modelos analisados. A) diâmetro da sonda = 3 mm; Altura das bobinas de excitação= 1 mm; Comprimento da sonda= 20 mm. B) diâmetro da sonda = 5 mm; Altura das bobinas de excitação= 4 mm; Comprimento da sonda= 20 mm.

Para cada geometria foi verificada a diferença entre a voltagem de cada uma das bobinas de recepção, simulando assim uma conexão diferencial entre elas. A melhor configuração da TRod2 obtida será então, aquela que apresentar a maior diferença entre as voltagens das bobinas de recepção. A equação 10 foi utilizada para extrair os valores de voltagem de cada uma das bobinas de recepção. A figura 5.31 apresenta uma seção transversal da bobina indicando alguns dos parâmetros que foram utilizados nesta equação.

$$V_{out} = -j\omega 2\pi \frac{n}{b(R_2 - R_1)} \sum_{i=1}^{N_e} r_{ic} A_{ic} \Delta_i \quad (10)$$

Onde:

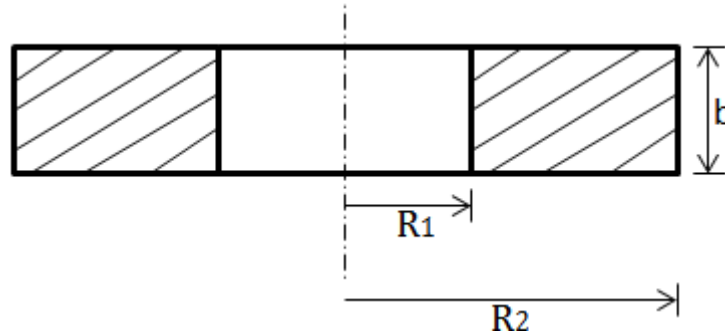


Figura 5.31: Seção transversal da bobina de recepção. Sendo: b , a altura da bobina, R_1 o raio interno e R_2 o raio externo.

$\omega \rightarrow$ Frequência angular,

$n \rightarrow$ Número de espiras da bobina,

$N_e \rightarrow$ Número de elementos finitos no domínio,

$r_{ic} \rightarrow$ Distância da linha de centro ao centro de gravidade do elemento finito,

$A_{ic} \rightarrow$ Vetor potencial no centro de gravidade do elemento finito,

$\Delta_i \rightarrow$ Superfície do elemento finito.

Como pôde ser visto pela quantidade de parâmetros geométricos variados, será preciso gerar diversos modelos para analisar todas as geometrias propostas. Para que seja possível avaliar a diferença entre a voltagem das bobinas de recepção e finalmente conseguir definir qual é a melhor geometria, foi utilizado o *software* COMSOL Multiphysics 3.5a with Matlab. A única diferenciação desta versão do software para a utilizada anteriormente é que nesta é possível trabalhar com dois softwares mutuamente, de forma que, as geometrias podem ser geradas a partir de rotinas no Matlab, e, a criação da malha e a solução do modelo, em COMSOL. Essa comunicação entre os softwares facilitou bastante a otimização, pois em Matlab foi possível implementar um laço (*loop*) para a geração das geometrias em uma única rotina. A figura 5.32 apresenta

uma seção do código em Matlab onde é feito o calculo para determinar a voltagem nas bobinas de captação do sinal.

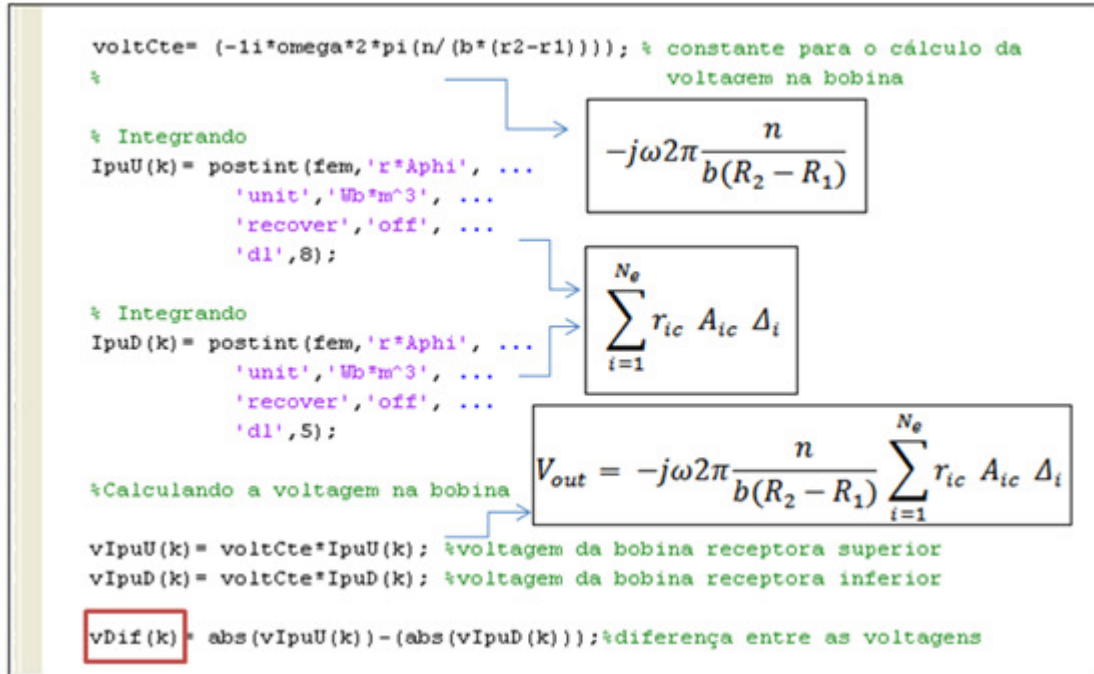
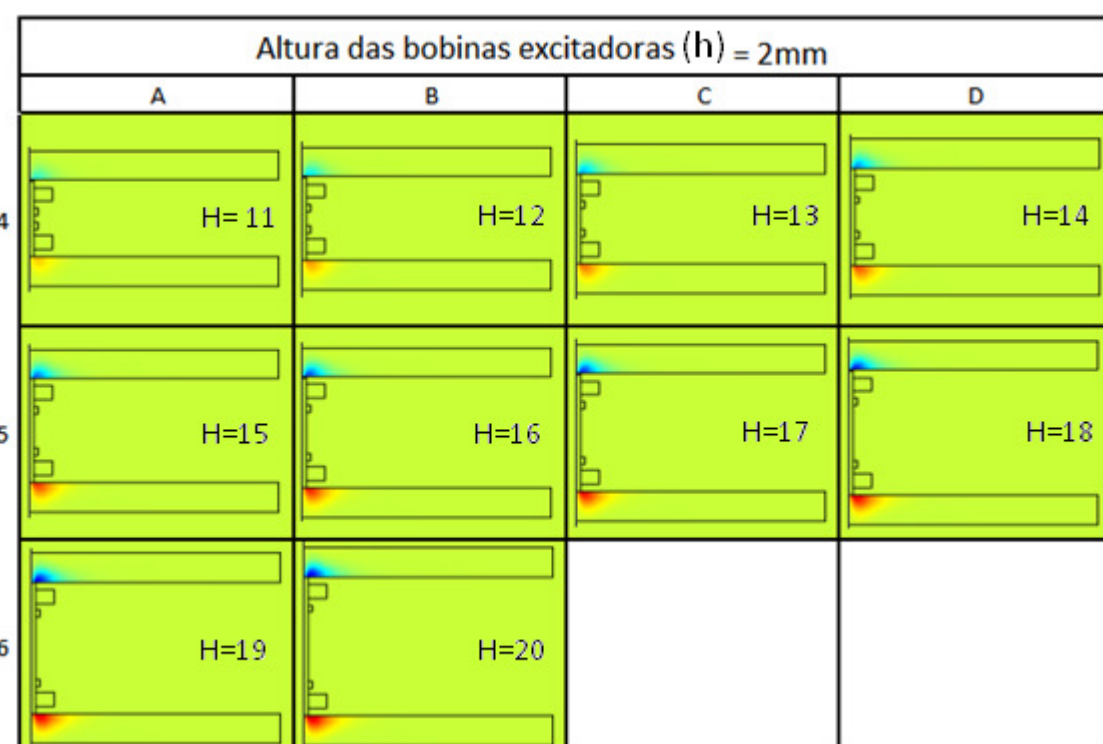
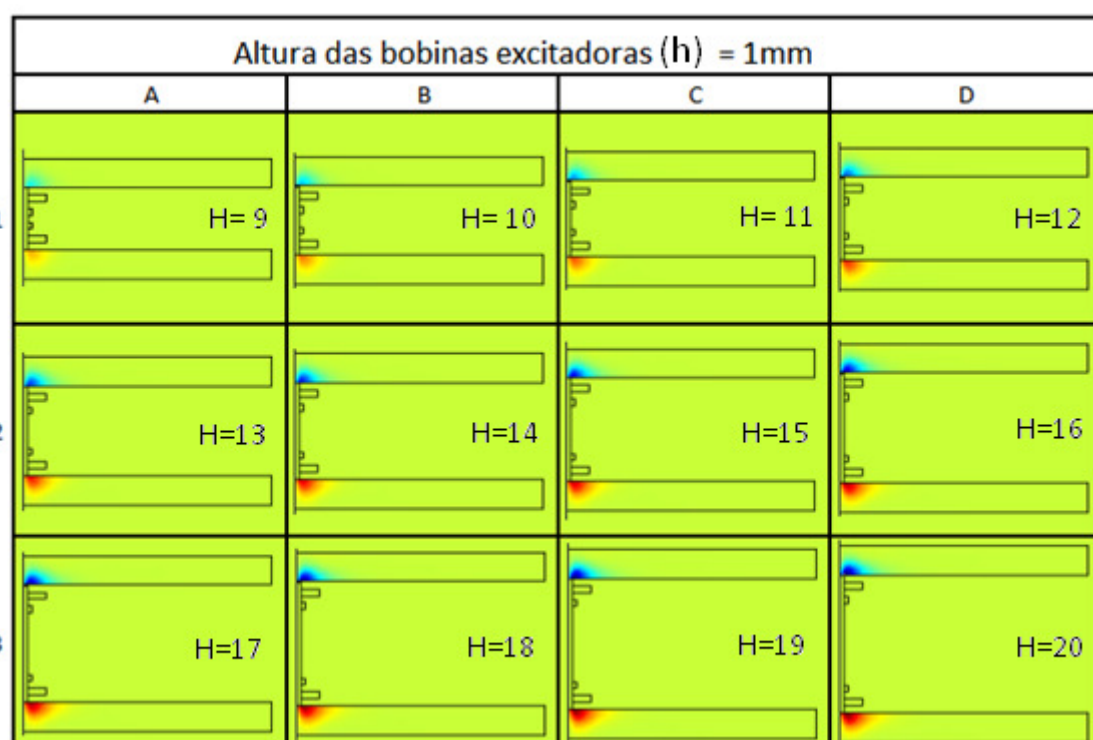


Figura 5.32: Rotina implementada em Matlab para a determinação da voltagem nas bobinas de recepção. As setas em azul indicam a equivalência do código na equação 10.

A figura 5.33 apresenta uma sequência dos modelos gerados por uma rotina de otimização para o diâmetro da sonda igual a 5 mm. Nesta figura é possível verificar as diferentes geometrias analisadas. Vale lembrar que a mesma quantidade de simulações foi feita para o diâmetro de 3 mm, no entanto, estas imagens não serão apresentadas devido a semelhança visual com os resultados que serão exibidos a seguir. Nesta imagem é importante verificar a variação da densidade das correntes induzidas de acordo com a geometria da sonda.



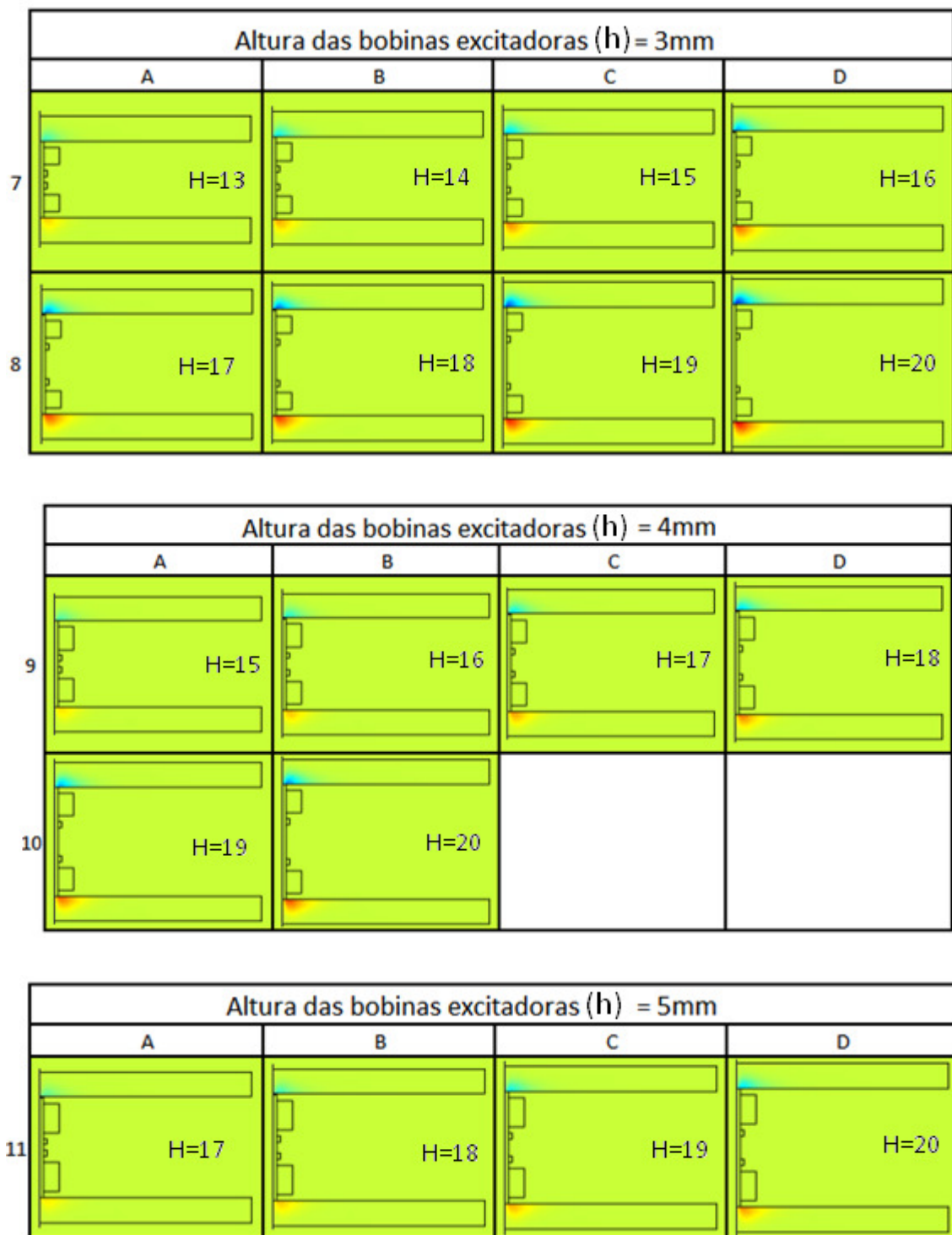


Figura 5.33: Diferentes geometrias analisadas da sonda para o raio de 5mm.

Como mencionado anteriormente o importante na análise de cada modelo é constatar qual deles apresenta a maior diferença entre a voltagem das bobinas de recepção. Os gráficos da figura 5.34 relacionam esta diferença com as geometrias simuladas. O eixo

das ordenadas apresenta o valor da diferença de voltagem, o das abscissas, as alturas do núcleo ferrítico (altura do sensor), e, cada linha presente no plano cartesiano indica a altura da bobina de excitação utilizada no modelo. Como pode ser visualizado, em algumas situações não é possível combinar todas as variações de geometria devido às incompatibilidades geométricas. Isto é, para uma sonda que possui duas bobinas de excitação com 5 mm de altura cada, não é possível combinar esta configuração com um núcleo ferrítico de 9 mm.

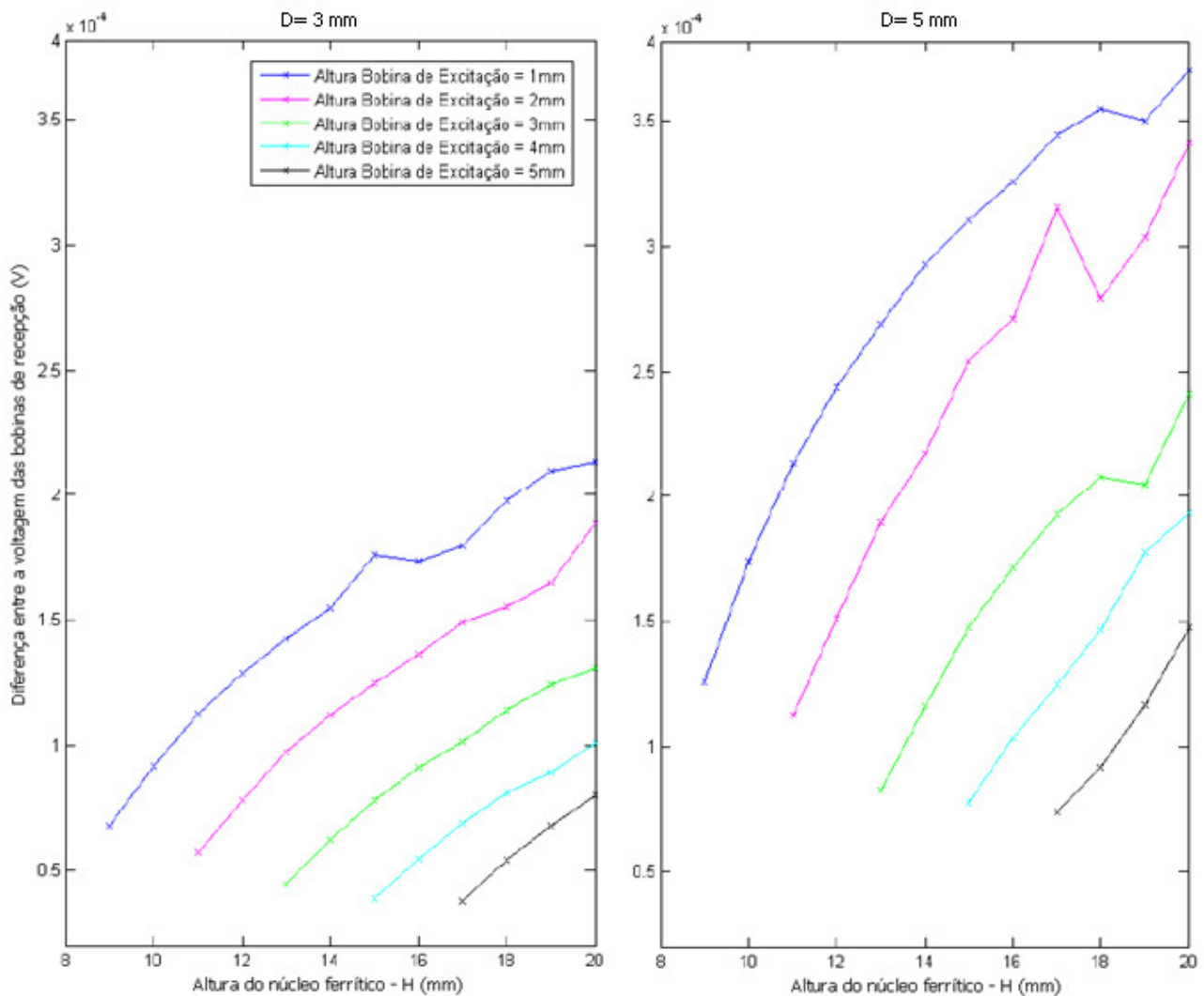


Figura 5.34: Relação entre a diferença de voltagem das bobinas receptoras e as geometrias dos sensores de correntes parasitas. À esquerda, sondas com 3 mm de diâmetro e, à direita, com 5 mm.

Ao analisar o gráfico da figura 5.34, observou-se que quanto maior é o diâmetro da sonda (bobinas de excitação mais largas), maior é a diferença entre as voltagens das bobinas de recepção. Este resultado já era esperado, pois aumentando a área efetiva da sonda aumenta-se a quantidade de correntes geradas. Entretanto, constatou-se um resultado curioso e, até o momento inesperado. O aumento da diferença entre a voltagem das bobinas é proporcional à altura do núcleo ferrítico. Ou seja, à medida que se aumenta a altura do núcleo ferrítico a diferença de voltagem também é acrescida. Além disso, esta diferença é inversamente proporcional à altura da bobina de excitação. Este resultado pôde ser observado em ambos os diâmetros. A hipótese levantada para tal resultado é a geração de uma interferência destrutiva nos campos magnéticos gerados pelas bobinas excitadoras. Como cada bobina está com uma polaridade que é o inverso da outra, o campo magnético gerado possui sentido contrário e, quanto mais próximo as bobinas estão uma das outras, maior é o efeito de interferência entre elas. Por conta disso, menor é o campo resultante para a geração das correntes induzidas e consequentemente menor é a interação deste campo com as bobinas receptoras. Nas imagens da figura 5.33 é possível verificar esse fenômeno - à medida que a distância entre as bobinas de excitação aumenta, maior é a quantidade de correntes induzidas. Outro fato que comprova esta hipótese é a altura das bobinas de excitação. Quanto mais alongada é a bobina, maior é o campo gerado e consequentemente esta interferência destrutiva. Visando estudar com mais detalhes esta interferência foram destacados dois modelos com a mesma altura, no entanto, com bobinas de excitação em tamanhos diferentes. A figura 5.35 apresenta dois modelos com as linhas de fluxo magnéticas geradas por cada uma das bobinas. O modelo 'A' possui bobinas de excitação com 1 milímetro de altura, enquanto o 'B' com 4 milímetros. A região pontilhada, destacada em cada modelo apresenta a região onde o laço (*loop*) do fluxo magnético de cada bobina se encontram (chocam). Na imagem 'A' é possível verificar que mesmo havendo uma região de interferência, a densidade das linhas de fluxo na região central de ambas as bobinas não é tão grande quanto na figura 'B'. Outra característica que comprova a interferência destrutiva é a amplitude do laço gerado por cada um dos modelos.

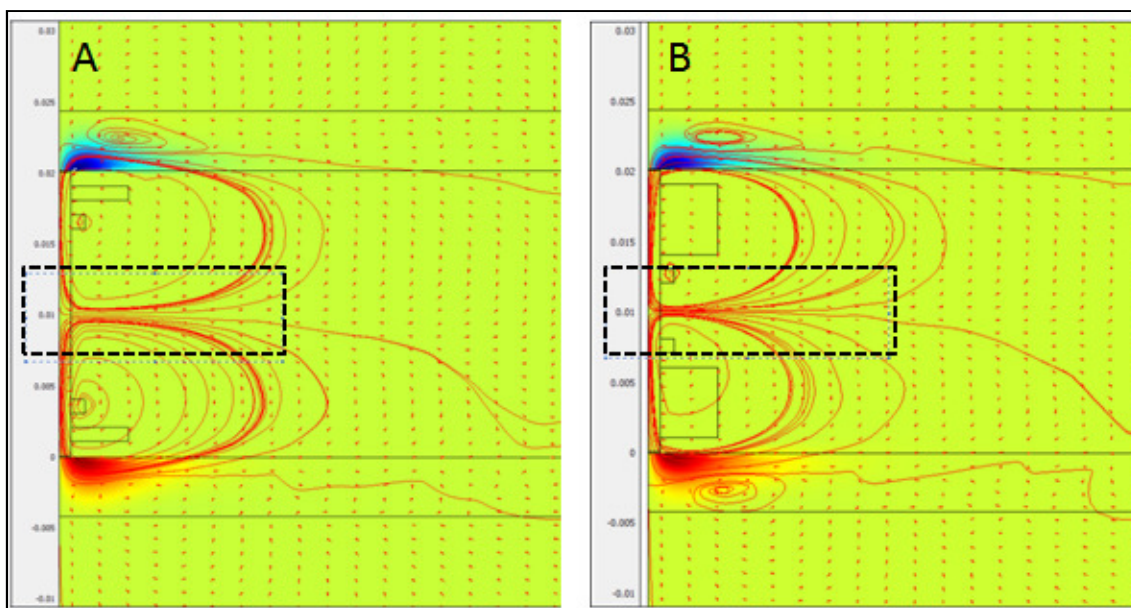


Figura 5.35: Comparação das linhas de fluxo magnético gerada por cada uma das geometrias. A) Bobinas de excitação pequenas resultando em uma interferência menor.
B) Bobinas de excitação grandes resultando em uma maior interferência.

Finalmente, analisando novamente os gráficos da figura 5.34, concluiu-se que as melhores geometrias para a caracterização do aço inoxidável duplex a partir da sonda TRod2 são aquelas que apresentam bobinas de excitação curtas e estão contempladas em um núcleo ferrítico longo, de forma que fiquem distantes entre si para evitar que haja interferência entre elas.

5.8.2 – Construção das sondas em escala reduzida

A partir dos resultados de simulação foi construída a sonda de correntes parasitas TRod2 em escala reduzida. Para diferenciá-la das sondas com dimensões maiores, esta nova sonda será referenciada com o prefixo ‘S’, que indica, do inglês *small*, menor, ficando nomeada, portanto, STRod2.

Dentre os diâmetros simulados foi utilizado para a construção o valor de cinco milímetros. Apesar do diâmetro de três ser o mais indicado para a inspeção das ZTAs,

como uma sonda com esta configuração nunca havia sido construída com dimensões tão pequenas, decidiu-se trabalhar com os cinco milímetros devido à maior resposta do sensor encontrada nas simulações. Além disso, como a construção é manual, e, os componentes da sonda (fios de cobre, núcleo...) são bastante delicados, este diâmetro maior facilita a etapa de construção.

O fio esmaltado de cobre utilizado para a construção das bobinas de excitação apresenta um diâmetro de 0,2 milímetros e o utilizado para as bobinas de recepção 0,04. O núcleo ferrítico apresenta 20 milímetros de comprimento e 1,8 milímetros de diâmetro. A figura 5.36 apresenta um esquemático da sonda STRod2 com as suas respectivas dimensões. Em vermelho as bobinas de excitação, em verde as de recepção, em cinza o núcleo ferrítico e próximo as bobinas de excitação está a amostra de referência e a com fase sigma precipitada.

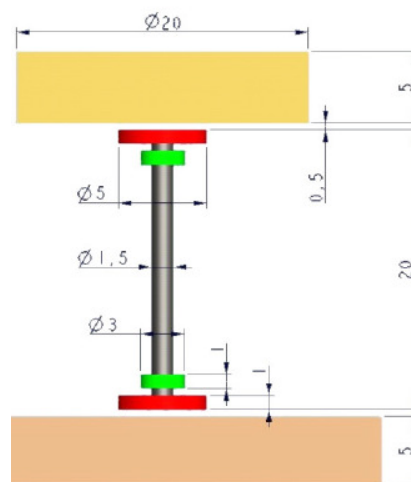


Figura 5.36: Desenho com o dimensional da sonda STRod2.

A figura 5.37 apresenta algumas fotos da sonda já construída. Onde na imagem 'A' é possível ver uma das faces da sonda apontada com o número um e a cápsula de acrílico para a sua proteção. Na 'B' é possível visualizar a sonda e a amostra de referência destacada com o número três. A imagem 'C' apresenta a sonda STRod2 durante a varredura. O número dois exibe o material com fase sigma precipitada.

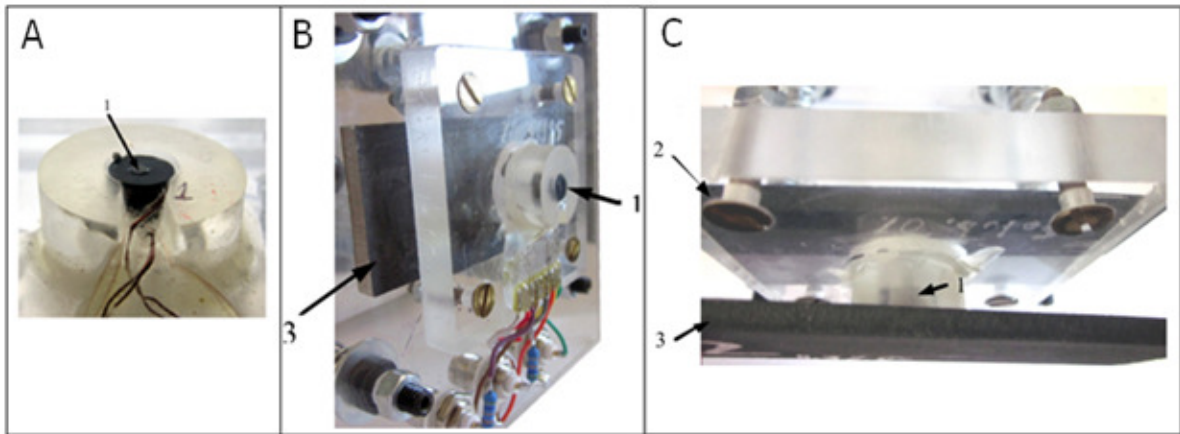


Figura 5.37: Fotos do sensor TRod2. Onde o número 1 representa a sonda, o 2 a amostra de referência e o 3 a amostra inspecionada. A: foto da sonda com a proteção de acrílico. B: sonda com a amostra de referência. C: sonda durante a varredura da amostra com 8,3% de fase sigma.

Como dito anteriormente uma sonda em escala reduzida com a configuração Double ‘C’ Core também foi construída. O menor núcleo em formato de ‘C’ (ou ferradura) encontrado nos catálogos de fabricantes está apresentado na figura 5.38 A e foi utilizado para a construção da sonda apresentada na 5.38 B.

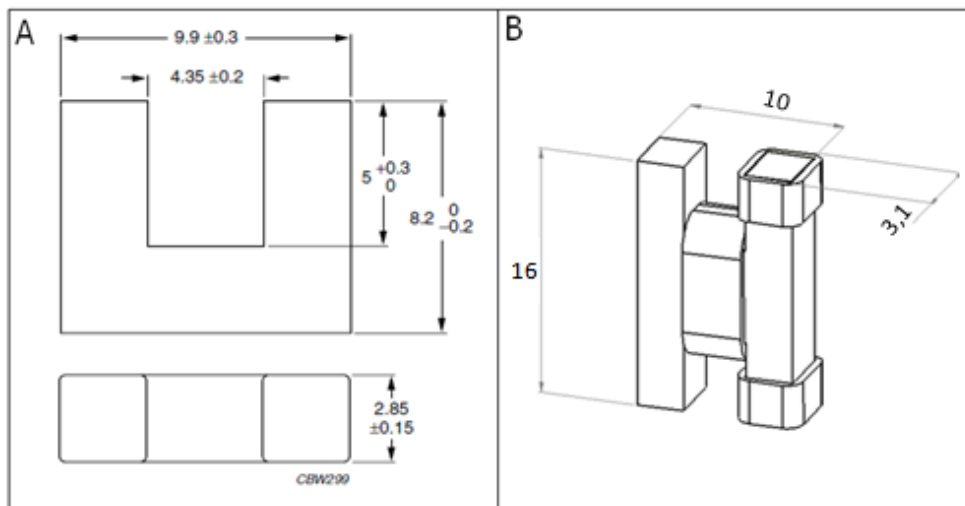


Figura 5.38: A: Vista frontal e superior do núcleo ferrítico utilizado para a construção da sonda Double ‘C Core – Catálogo FerroxCube [44]. B: Dimensões da sonda com a bobina de excitação e as de recepção.

A figura 5.39 apresenta fotos da sonda Double 'C' core já construída

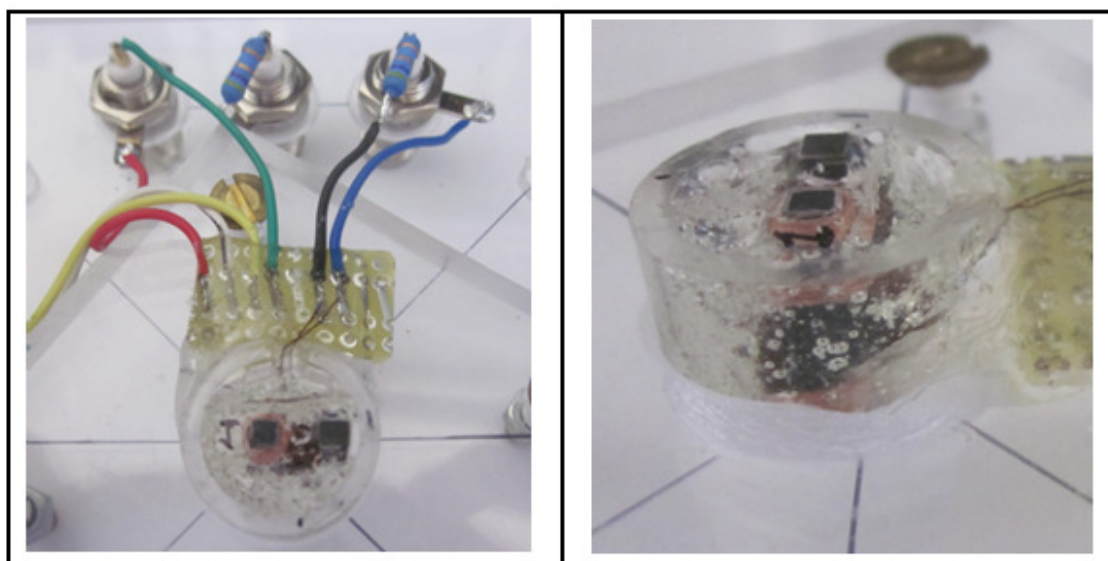


Figura 5.39: Fotos da sonda Double 'C' Core construída.

5.8.3 – Resultado das inspeções com as sondas desenvolvidas

Depois de finalizada a construção, foi testado o desempenho de cada uma das sondas de correntes parasitas frente à identificação da fase sigma. Todas as amostras (com fase sigma e com microestrutura desbalanceada) foram inspecionadas com ambos os sensores. A frequência utilizada nas sondas foi de 7 kHz e a corrente elétrica aplicada foi de 100 mA para a STRod2 e de 40 mA para outra. A figura 5.40 e 5.41 apresentam a média das varreduras das amostras com as sondas, STRod2 e Double 'C' Core, respectivamente.

Ambas as sondas conseguiram diferenciar as amostras com fase deletéria precipitada das com microestrutura desbalanceada, de forma que, à medida que a quantidade de fase sigma aumentava, a distância para a amostra solubilizada era acrescida, assim como nos resultados com os transdutores maiores. Entretanto, assim como nos resultados anteriores, não foi possível fazer uma diferenciação entre as amostras sem fase sigma, mas com diferentes teores de ferrita e austenita.

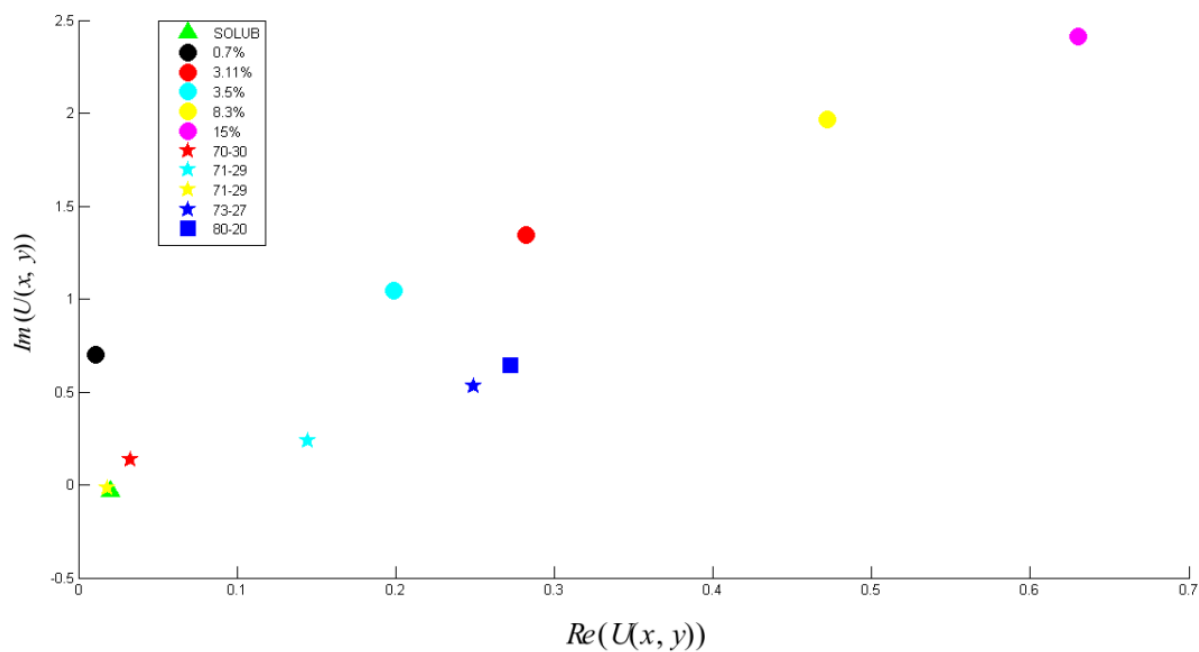


Figura 5.40: Resultado de inspeção da sonda STRod2.

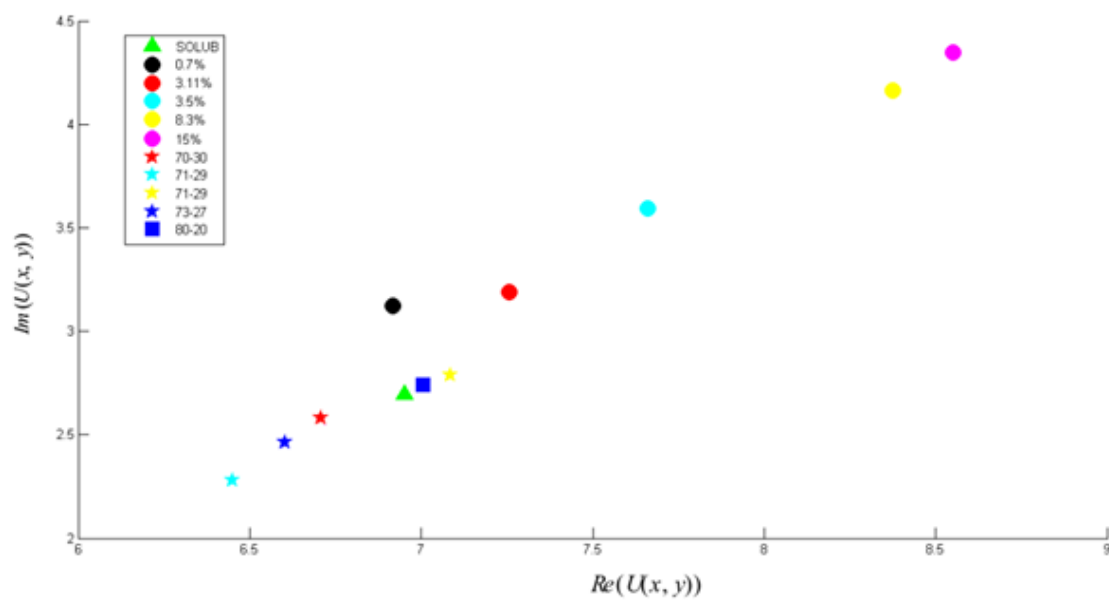


Figura 5.41: Resultado de inspeção da sonda Double 'C' Core.

5.8.4 – Definição da melhor sonda desenvolvida para inspecionar as ZTAs

A partir dos resultados das figuras 5.40 e 5.41 buscou-se analisar a variação dos parâmetros que determinasse qual é a melhor sonda para a inspeção de juntas soldadas dos aços inoxidáveis duplex. Em correntes parasitas os parâmetros que definem o resultado de uma inspeção, são a amplitude e a fase do sinal no plano de impedância complexo [22]. Avaliando a variação da fase em ambos os resultados, verificou-se que na STRod2 o resultado da inspeção das amostras com fase sigma estão todas defasadas em relação às com desbalanceamento, enquanto que, com a sonda Double ‘C’ Core a variação da fase foi menor. Algumas amostras com fase sigma estão, inclusive, praticamente com a mesma fase das com desbalanceamento. Em relação à amplitude, ambos proporcionaram uma boa variação, embora a apresentada pelo sensor Double ‘C’ Core tenha sido consideravelmente maior, principalmente em relação a componente real. Mesmo apesar desta maior variação da amplitude oferecida pela Double ‘C’ Core a STRod2 foi definida como a melhor sonda para a inspeção de juntas soldadas devido a maior variação do sinal em termos de fase. A figura 5.42 reapresenta o resultado de inspeção desta sonda incluindo uma função linear separando as amostras com fase sigma das demais. Essa separação, por exemplo, é difícil de ser realizada nos resultados obtidos com a Double ‘C’ Core.

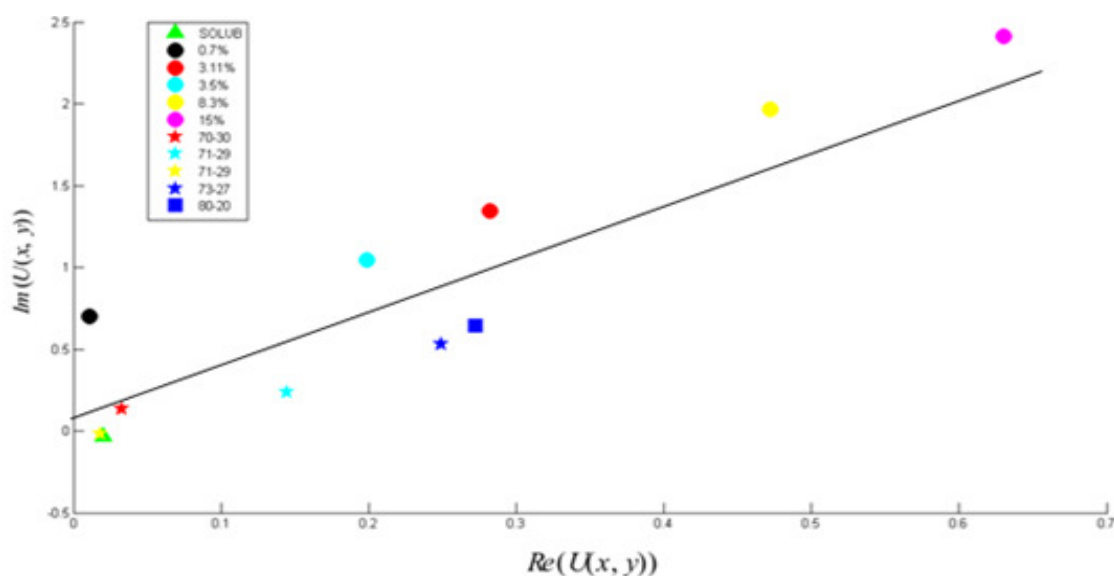


Figura 5.42: Resultados da sonda STRod2 com uma separação entre as amostras com a fase deletéria precipitada e as demais.

5.8.5 – Análise da influência da superfície da amostra na inspeção da sonda STRod2

Como foi preciso aumentar frequência de excitação da sonda STRod2 para aumentar a sua sensibilidade, conseqüentemente a profundidade padrão de penetração foi diminuída. Visando investigar a influencia da superfície nos ensaios com esta sonda, foi feito um polimento mecânico em uma das faces de duas amostras com fase sigma. As amostras #07 (0,7%) e #10 (15%) foram inspecionadas em duas faces. A figura 5.43 apresenta uma foto da amostra #10 com um dos lados polidos e o outro não.

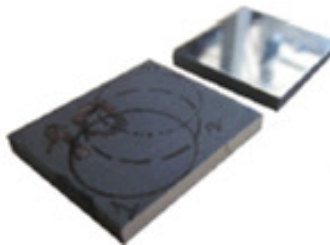


Figura 5.43: Foto das faces da amostra #10.

A figura 5.44 apresenta o resultado de inspeção das amostras com fase sigma e da amostra solubilizada. Na legenda, as siglas ‘up’ e ‘p’ indicam qual lado da amostra foi feito a varredura, estando ‘up’ relacionado à superfície sem polimento. Como pode ser visto, houve uma variação do sinal de acordo com a superfície, entretanto, bastante pequena, de forma que esta variação não interfere na diferenciação das demais amostras. Portanto, o saldo obtido com este teste indica que a variação do sinal de acordo com a superfície, existe, no entanto, para efeitos práticos, quando a superfície sem polimento está íntegra, esta variação pode ser desconsiderada.

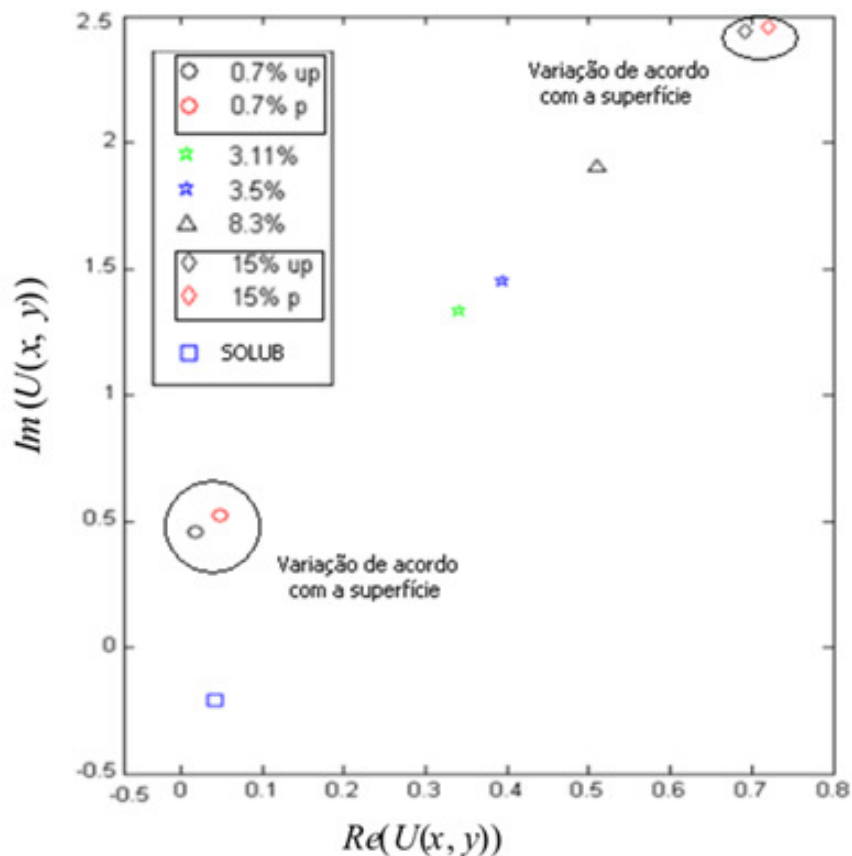


Figura 5.44: Plano de impedância complexo indicando a variação entre do resultado de acordo com a condição da superfície.

5.9 - Inspeção de juntas soldadas

Com o intuito de verificar o desempenho das sondas fabricadas em escala reduzida frente ao desafio de inspecionar juntas soldadas do aço inoxidável duplex, foi feito uma varredura com as sondas em uma amostra com uma junta soldada que possui uma ZTA de aproximadamente 2 mm, destacada na figura 5.27. A figura 5.45 apresenta uma foto desta mesma amostra, no entanto, ao invés de destacar a ZTA foi destacado o percurso o de varredura das sondas. Inicialmente foi testada a STRod2 devido aos resultados apresentados nos ensaios preliminares. A varredura foi feita com uma mesa automatizada, apresentada no capítulo quatro, onde o passo era de 1 mm e estava sincronizado com a aquisição do sinal da sonda.

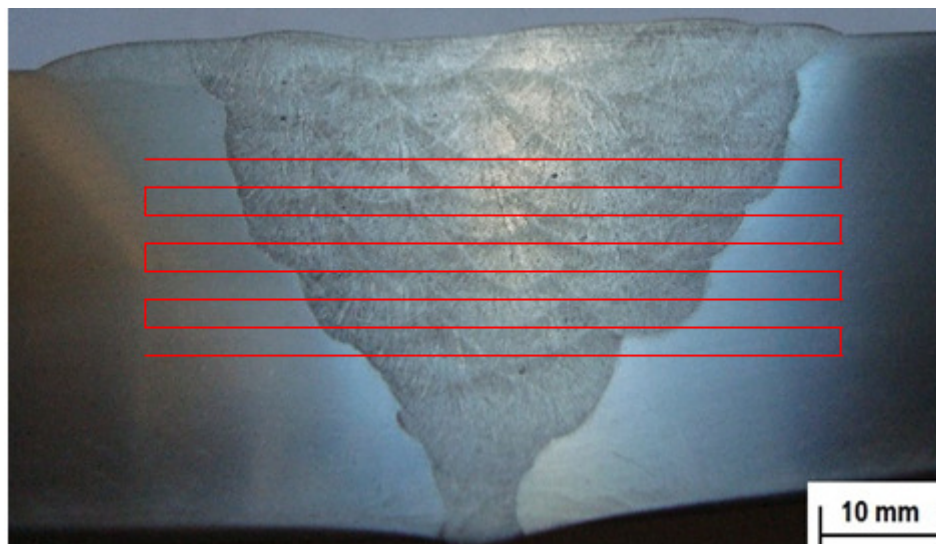


Figura 5.45: Junta soldada com o percurso de varredura da sonda.

A figura 5.46 apresenta os resultados da varredura feita com o sensor STRod2. Como a saída do equipamento desenvolvido pela *West Pomeranian University of Technology* para a inspeção é a componente real e complexa do sinal, inicialmente foram reconstruídas duas imagens da junta, sendo uma com a amplitude dos sinais e outra com a fase. As setas em vermelho indicam a posição das ZTAs, e, como pode ser visualizado, elas puderam ser detectadas com a análise de ambos os parâmetros. Entretanto, no caso da análise da amplitude do sinal as zonas ficaram mais bem delineadas. Visando destacar com mais clareza as ZTAs, foi feito uma imagem com o gradiente das amplitudes na direção x, figura 5.47. Como é possível visualizar, as regiões que apresentaram as maiores variações foram exatamente as correspondentes às ZTAs. Além do gradiente foi feito uma imagem em três dimensões da variação da fase, figura 5.48. Nesta superfície é possível visualizar as regiões de interesse, as ZTAs.

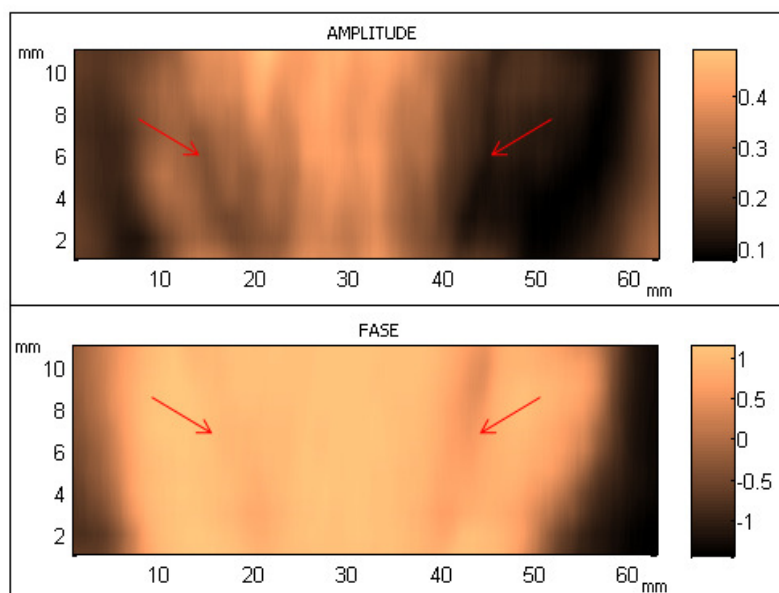


Figura 5.46: Amplitude e fase dos sinais da varredura. Em destaque as ZTAs.

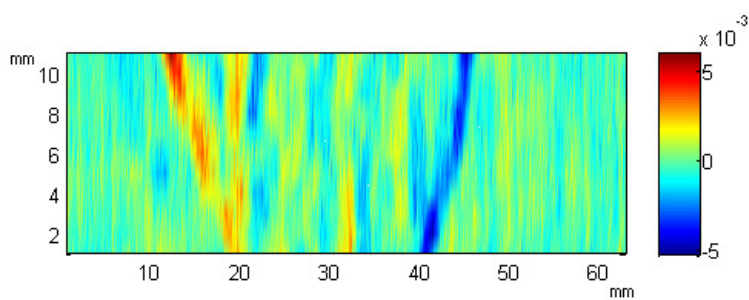


Figura 5.47: Gradiente na direção x da amplitude dos sinais.

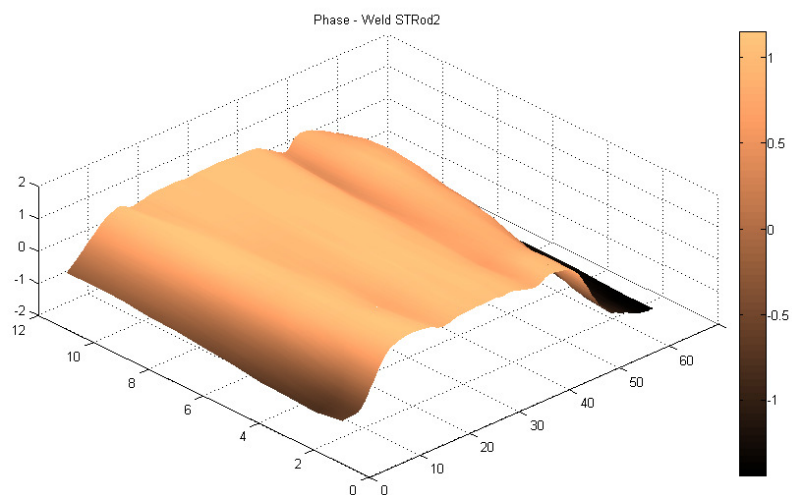


Figura 5.48: Superfície gerada com a variação da fase do sinal adquirido.

O mesmo procedimento foi feito com o sensor Double 'C' Core. No entanto, os resultados alcançados, principalmente em relação a fase, não foram tão expressivos, muito provavelmente pelas dimensões da sonda ainda estarem grandes para tal aplicação.

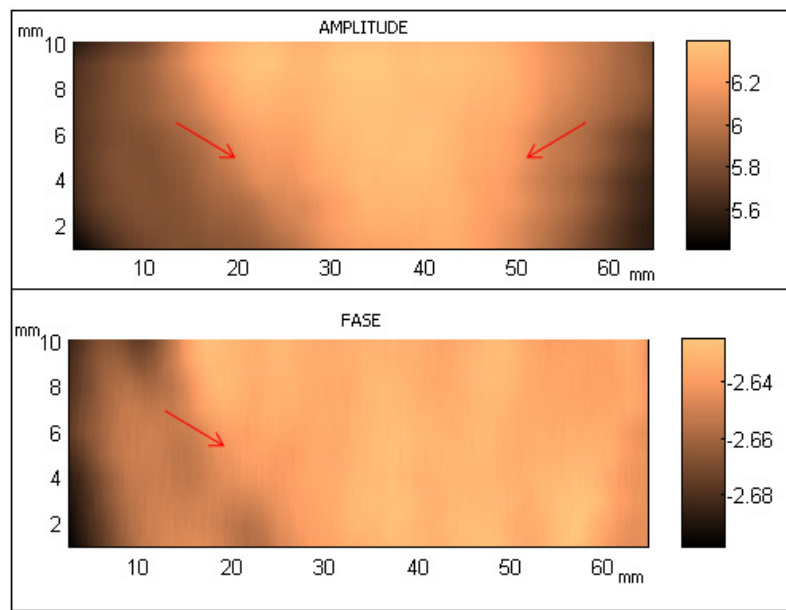


Figura 5.49: Amplitude e fase dos sinais da varredura. Em destaque as ZTAs.

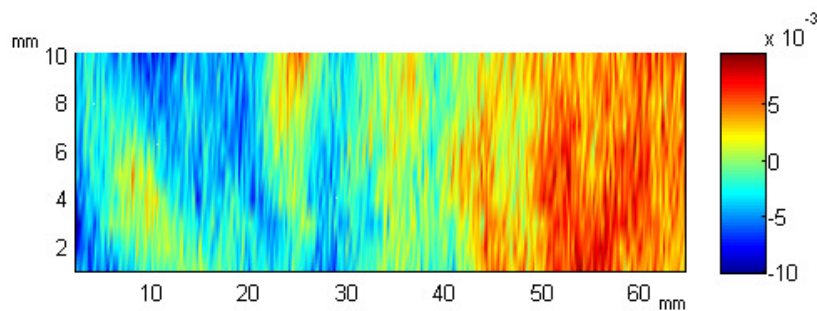


Figura 5.50: Gradiente da amplitude dos sinais.

5.10- Proposta de outra configuração da sonda STRod2 para a inspeção de ZTAs

Apesar dos bons resultados alcançados com a sonda STRod2, esta configuração apresenta algumas desvantagens. Esta seção tem como objetivo apresentar sugestões para desenvolvimentos futuros de sondas que chegaram a ser previstas durante o trabalho, mas que por questão de tempo não puderam ser construídas.

Uma grande desvantagem das sondas de caracterização testadas, TRod1 e 2, Double ‘C’ Core, e STRod2 é o fato destas configurações precisarem de uma amostra de referência para operação. Numa situação de laboratório, esta questão não é muito problemática pois geralmente se possui várias amostras de um mesmo material, no entanto, tratando-se de situações de campo, na maioria dos casos não se tem uma amostra de referência do material que foi utilizado no equipamento que se deseja inspecionar, que seja idêntica à utilizada na sua confecção. Ou seja, para que fosse possível trabalhar com esta sonda em casos reais seria necessário que antes do equipamento entrar em operação fosse preciso retirar amostras do equipamento, e, é sabido, que esta situação é bastante difícil de ser encontrada na prática. Além desta limitação de precisar sempre de amostras virgens como referência, as sondas que possuem quatro bobinas no mesmo núcleo, caso das TRod, apresentam, como apontado nos resultados apresentados, uma interferência destrutiva entre os fluxos gerados por cada uma das bobinas excitadoras e, por conta disso é preciso aumentar a distância entre as bobinas ou diminuir o tamanho delas, o que acarreta numa menor sensibilidade do sensor. Visando contornar estas limitações, principalmente da sonda STRod2, que apresentou um resultado razoável frente a inspeção de ZTAs, foi proposta a configuração apresentada pela figura 5.51 ‘A’ e ‘B’. Esta configuração apresenta dois núcleos separados, mas com uma conexão diferencial entre as bobinas receptoras ligando as duas barras de ferrita. A vantagem desta configuração seria conseguir inspecionar as ZTAs com um dos núcleos localizado sobre a zona que se deseja inspecionar e o outro sobre o metal base, servindo como referência. Além disso, esta configuração não teria problemas de interferência entre as bobinas excitadoras, pois elas estarão afastadas uma da outra e em núcleo distintos. Figura 5.51 ‘A’ e ‘B’.

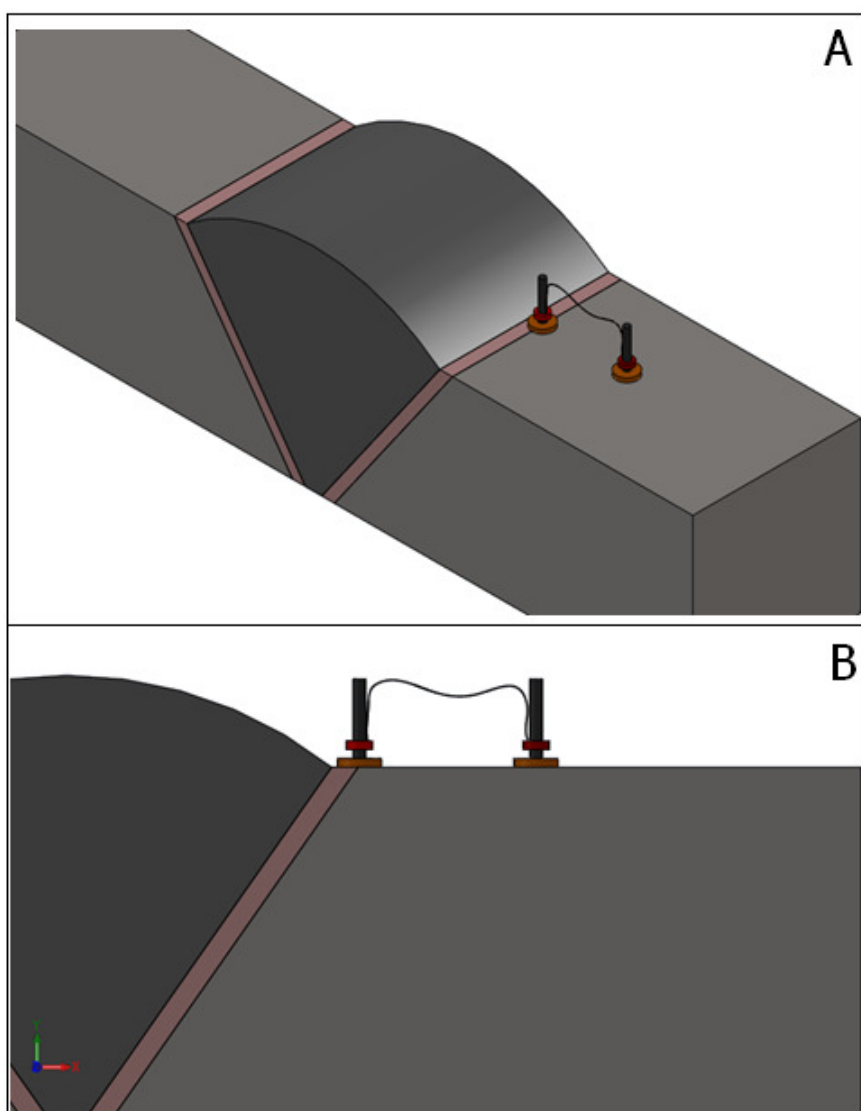


Figura 5.51: Vistas da configuração da sonda proposta para inspeção de ZTAs de juntas soldadas do aço inoxidável duplex. A: Vista isométrica. B: Vista frontal.

Capítulo 6 – Considerações finais

A proposta desta dissertação foi desenvolver sensores de correntes parasitas para a inspeção dos aços inoxidáveis duplex. Para que fosse feito o desenvolvimento, uma série de configurações de sondas foram testadas face à identificação de fase sigma. A configuração que apresentou o melhor desempenho foi aprimorada de forma que fosse capaz inspecionar regiões pequenas, como por exemplo, as ZTAs. Dentre as configurações de sondas testadas, podemos dividi-las em dois grupos: as sondas convencionais e as sondas não convencionais.

○ Sondas convencionais

Neste grupo se encaixam as sondas absolutas. Tais sondas deram início ao estudo desta dissertação, pois foram os arranjos utilizados pelos autores que publicaram trabalhos nesta área de inspeção de fase sigma em aços inoxidáveis duplex a partir de sondas de correntes parasitas.

Inicialmente foi estudado as características da sonda utilizada por um dos autores, e, a partir de simulações com o *software* comercial COMSOL Multiphysics foi desenvolvida uma sonda com geometria idêntica, porém com alguns aprimoramentos nos componentes da sonda, entreferro e bobina. Depois de finalizado o processo de simulação, a sonda foi construída e testada. O seu resultado foi comparado com o resultado de outras três sondas, sendo duas comerciais do fabricante ZETEC e uma desenvolvida por um dos autores estudados na revisão bibliográfica.

Das quatro sondas testadas, a sonda desenvolvida a partir dos resultados de simulação apresentou uma leve superioridade em termos de distinção das amostras com diferentes teores de fase sigma. As sondas comerciais não apresentaram um resultado suficiente para a caracterização do aço inoxidável duplex.

○ Sondas não convencionais

Em parceria com a universidade polonesa *West Pomeranian University of Technology*, uma série de configurações de sondas não encontradas comumente no mercado foram testadas, são elas: Five Legs, Trod1, TRod2 e Double 'C' Core. Dentre estas sondas, a Five Legs foi a única que não foi capaz de distinguir as

amostras com fase sigma da solubilizada. Dentre as sondas que foram capazes de identificar a fase sigma, a sonda TRod2 e a Double 'C' Core foram as escolhidas para serem desenvolvidas em escalas reduzidas para a inspeção das zonas termicamente afetadas (ZTAs) nos aços inoxidáveis duplex.

Para o desenvolvimento da sonda TRod2 em escala reduzida foi utilizado o *software* comercial COMSOL Multiphysics 3.5a with Matlab, o desenvolvimento deu origem a sonda STRod2. Para o desenvolvimento da sonda Double 'C' Core em escala reduzida não foram feitas simulações, foi buscado nos fornecedores de núcleos ferríticos o menor núcleo no formato necessário para construir a sonda.

A sonda STRod2 conseguiu diferenciar com clareza as amostras com diferentes teores de fase sigma, além disso, conseguiu também identificar as ZTAs em uma amostra do aço inoxidável duplex que possui uma junta soldada. Enquanto que, a sonda Double 'C' Core em escala reduzida apesar de também ter sido capaz de diferenciar as amostras com diferentes teores de fase sigma, esta configuração não foi capaz de identificar com clareza as ZTAs na amostra com a junta soldada.

Nenhuma das sondas testadas, sendo ela convencional ou não convencional, foi capaz de diferenciar as amostras com desbalanceamento microestrutural, isto é, com diferentes porcentagens de ferrita/austenita e sem a presença de fases deletérias. Este evento comprova os resultados obtidos no trabalho analisado e descrito na revisão bibliográfica, capítulo três, que diz que sondas de correntes parasitas por normalmente trabalharem com campos magnéticos baixos não são capazes de diferenciar tais anomalias.

Capítulo 7 – Conclusões

- Tratando-se da caracterização dos aços inoxidáveis duplex frente à identificação da fase sigma, pode-se dizer que as sondas absolutas desenvolvidas em laboratório apresentaram um resultado superior em relação às sondas comerciais. Além disso, o aprimoramento da sonda absoluta apresentou, mesmo que em proporções pequenas, uma melhoria no resultado final de inspeção.
- A sonda Five Legs não apresentou um resultado suficiente para a caracterização do aço inoxidável duplex, embora seja poderosa perante a identificação de defeitos.
- A sonda TRod1 apresentou um bom resultado frente a identificação de fase sigma nos aços inoxidáveis duplex.
- A sonda TRod2 apresentou um resultado superior a sonda TRod1, tanto em variação de amplitude do vetor de impedância quanto em variação de fase.
- A sonda Double ‘C’ Core apresentou um bom resultado frente a identificação de fase sigma nos aços inoxidáveis duplex. Inclusive com maior variação de amplitude do vetor de impedância do que a sonda TRod2, mesmo operando com um sinal de excitação com menor amplitude.
- A figura 7.1 apresenta em um único gráfico os resultados de inspeção com as sondas TRod1, Trod2 e Double ‘C’ core. Neste gráfico é possível visualizar o melhor desempenho alcançado com a sonda TRod2 e Double ‘C’ Core em termos de amplitude do sinal e diferenciação das amostras com diferentes teores de fase sigma.

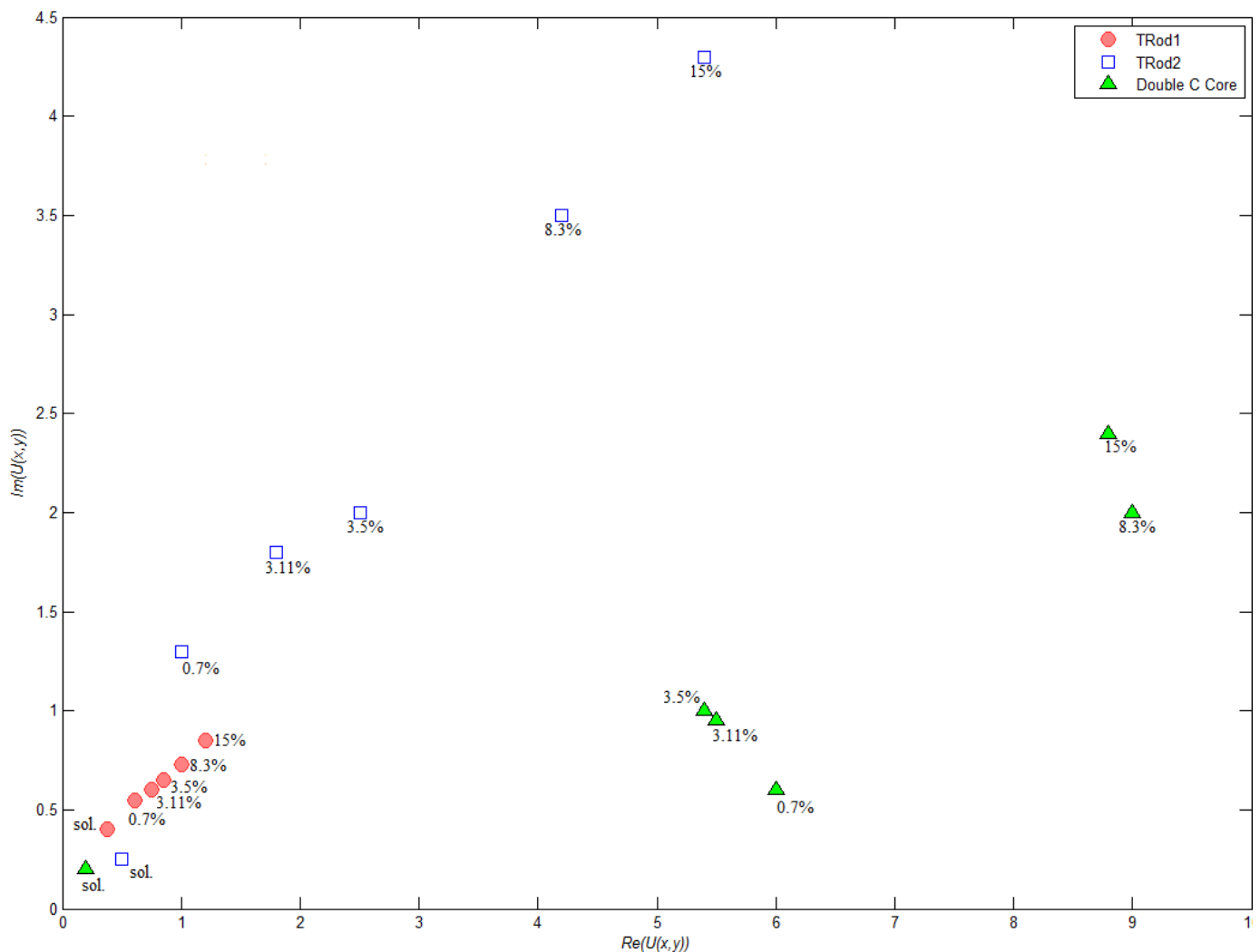


Figura 7.1: Comparação entre os resultados de inspeção com as sondas TRod1, Trod2 e Double ‘C’ Core.

- Sondas que operam com circuito magnético fechado concentram mais as linhas de fluxo magnético e aumentam a sensibilidade da sonda e a profundidade de penetração.
- A sonda Double ‘C’ Core desenvolvida em escala reduzida apresentou um bom resultado perante a identificação de fase sigma, apesar de não ter apresentado uma grande variação de fase entre as amostras com e sem fase sigma. Não conseguiu destacar com clareza as ZTAs da amostra com uma junta soldada.

- A sonda STRod2 desenvolvida a partir de simulações apresentou um bom resultado perante a identificação das amostras com diferentes teores de fase sigma. Além disso, a sonda foi capaz de identificar as ZTAs com dois milímetros de largura da amostra que apresenta uma junta soldada. Dado estes resultados, acredita-se que esta sonda seja capaz de identificar diferentes porcentagens de precipitações de fase sigma nas ZTAs.

Capítulo 8 – Sugestões para trabalhos futuros

- Construir e testar o modelo de sonda sugerido pelo item 5.10 do capítulo cinco.
- Construir uma sonda com o a configuração da STRod2, no entanto com um diâmetro menor, três milímetros por exemplo, com o objetivo de delinear com mais clareza as ZTAs.
- Fabricar diversas amostras de aço inoxidável duplex com uma junta soldada, controlando a precipitação de fase sigma nas ZTAs, para que seja possível obter diferentes amostras com diferentes teores de fase sigma nas ZTAs.
- Fabricar uma amostra com uma solda padrão, isto é, sem a presença de fase sigma nas ZTAs.
- Testar as sondas nas amostras com a junta soldada com diferentes teores de fase sigma.
- Obter amostras reais e testar as sondas de correntes parasitas.
- Fazer testes com os aços inoxidáveis conhecidos comercialmente como Super Duplex e estudar se as configurações de sonda de correntes parasitas que apresentaram um resultado suficiente para os inoxidáveis duplex são aplicáveis também a este aço.
- Testar as sondas SLOFET (Saturated Low Frequency Eddy Current) para verificar a capacidade frente a identificação de amostras com desbalanceamentos microestruturais.

Referências bibliográficas

- [1] M. Senatore, L. Finzetto, E. Perea. *Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L*. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 60, n. 1, Mar. 2007. Available from <<http://www.scielo.br>.
- [2] Y. Maehara, *Precipitation of sigma phase in a 25Cr-7Ni-3Mo Duplex Phase Stainless Steel*, Tetsu-to-Hagané 67, (1981).
- [3] J.M.A Rebello, M.C.A López, R. Sacramento, *Quantification of Sigma Phase Precipitation by Magnetic Non Destructive Testing*, 15th International Workshop on Eletromagnetic Nondestructive Evaluation – ENDE, (2010).
- [4] E.I. Todorov, *Correlation between NDT Measurements and Sigma Phase Contents in Duplex Stainless Steels*, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation 28, 1259-1266, (2009).
- [5] K.S de Assis, *Caracterização por Correntes Parasitas da Degradação Microestrutural de Aços Duplex*, 10^a COTEQ, (2009).
- [6] M. Martins, L.C Castelleti, *Caracterização microestrutural do aço inoxidável super duplex ASTM A grau 6A*. 12^o CONAF – Congresso de Fundição, (2005).
- [7] H. Sieurin, *Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205*, Materials Science and Engineering A444, 271-276, (2006).
- [8] C.H. Shek, K.W. Wong, J.K.L. Lai, *Review of temperature indicators and the use of duplex stainless steels for life assessment*, Physics and Materials Science, (1996).
- [9] R.A Leite, *Avaliação da tenacidade à fratura de uma junta soldada de um aço inoxidável duplex*, Dissertação de mestrado, UFRGS, (2009).
- [10] R.N Gunn. *Duplex Stainless Steels Microstructure, properties and applications*. Ed. by Gunn R.N., Abington Publishing, Cambridge England.
- [11] B. Larsson, B. Lundqvist, *Selection of wrought duplex stainless steels*. In. *Welding, Brazing and Soldering*. ASM Handbook, 10a Ed., v. 6, ASM International USA, (1993).

- [12] D. Peckner, I.M. Bernstein, *Handbook of Stainless Steels*. McGraw - Hill book company.
- [13] R. Castro, J.J. Cadenet, *Selection of wrought duplex stainless steels*. In *Welding, Brazing and Soldering*. ASM Handbook, 10 Ed.
- [14] B.I. Voronenko, *Austenitic-ferritic stainless steels; a state-of-the-art review*, *Metal Science and Heat Treatment*, 428-436, (1997).
- [15] S.S.M. Tavares, J.M. Pardal, J.L. Guerreiro, A.M. Gomes, M.R. da Silva, *Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S3180*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322, L29-L33, (2010).
- [16] J. Michalska, M. Sozanska, *Qualitative and quantitative analysis of sigma and chi phases in 2205 duplex stainless steel*, *Materials Characterization*, 56, (2006).
- [17] K. Toshio, *Role of Sigma Phase on Hydrogen Embrittlement of Duplex Stainless Steels*, *Transactions of JWRI*, Vol. 34, No.2, (2005).
- [18] S.S.M. Tavares, J.L.G. Castro, R.R.A. Côrte, V.M. Souza, J.M. Parda, *Detecção de Pequenos Teores de Fase Sigma e Avaliação dos seus Efeitos na Resistência à Corrosão do Aço Inoxidável Duplex UNS S2180*, *ENGEVISTA*, Vol. 8, No. 2, p. 77-82, (2006).
- [19] Y. Maehara, *Precipitation of sigma phase in a 25Cr-7Ni-3Mo Duplex Stainless Steel*, *Tetsu-to Hagané*, 67, (1981).
- [20] R. Langeborg, *The physical metalurgy of stainless steels*, *Proceedings of international conference on stainless steels*, p. 11-24, Japan, (1991).
- [21] R.O. Carneval, P. C. F. Henriques, *Apostila de Ensaaios não-destrutivos por correntes parasitas*.
- [22] www.ndt-ed.org. Acessado em 05/10/2011.
- [23] G.P. Pires, *Simulação em ultra-som convencional e phased array*, *Dissertação de mestrado*, UFRJ, (2009).
- [24] L.L. da Silva, *Caracterização de revestimentos de níquel compósito por correntes parasitas*, *Tese de doutorado*, UFRJ, (2007).

- [25] F. Ribeiro, *Apostila de Introdução ao método dos elementos finitos*, Coppe, Programa de Engenharia Civil, UFRJ, (2004).
- [26] E.S Costa, *Modelamento matemático tridimensional, usando o método de elementos finitos, para o ensaio não destrutivo por correntes parasitas, com alimentação em tensão*, Dissertação de mestrado, CEFET – BH, (1995).
- [27] N. Ida, R. Palanisamy, W. Lord, *Eddy Current Probe Design Using Finite Element Analysis*, Materials evaluation, Vol.41, (1983).
- [28] *Characterization of Phases in Duplex Stainless Steel by Magnetic Force Microscopy/Scanning Kelvin Probe Force Microscopy*. Electrochemical and Solid-State Letters, 11 (7) C41-C45, (2008).
- [29] S.S.M. Tavares, M.R. da Silva, J.M. Neto, *Magnetic property changes during embrittlement of a duplex stainless steel*, Journal of Alloys and Compounds 313, 168-173, (2000).
- [30] I. Zucato, M. Moreira, I. Machado, S. Lebrão, *Microestrutural Characterization and Effect of Phase Transformations on Toughness of UNS S31803 Duplex Stainless Steel Aged Treated at 850 °C*, Materials Research, Vol. 5, No. 3, 385-389, (2002).
- [31] M.C. López, R. Sacramento, R. Sommer, D. Chávez, J.M.A. Rebello, *Understanding Sigma Phase Influence on the Magnetic Behavior of Duplex Stainless Steel*, ENDE, (2011).
- [32] www.valoronline.com.br/onlineempresas/4430169/pre-sal-deve-garantir-escala-para-novos-usos-de-aco-inox-no-brasilp. Acessado em 09/12/2010.
- [33] www.industrialheating.com/Articles/Cover_Story/725bb31fb6cb7010VgnVCM10000f932a8c0_____. Acessado em 16/12/2010.
- [34] ASTM-American Society for Testing Materials, *Standard test methods for detecting detrimental intermetallic phase in duplex austenitic-ferritic stainless steels*, ASTM A 923-03.

- [35] T. Chady, M. Enokizono, T. Todaka, Y. Tsuchida, R. Sikora, *A Family of Matrix Type Sensors for Detection of Slight Flaws in Conducting Plates*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-35, (1999).
- [36] T.Chady, R. Sikora, G. Psuj, M. Enokizono, and T. Todaka. *Fusion of Eletromagnetic Inspection Methods for Evaluation of Stress-Loaded Steel Samples*, IEEE, (2005).
- [37] T. Chady, P. Lopato, *Flaws Identification Using an Approximation Function and Artificial Neural Networks*, (2006).
- [38] T.Chady, R. Sikora, P. Baniukiewicz, P. Lopato, J. Kowalczyk, G. Psuj, M. Caryk, *Comparative Analysis of Selected Eddy Current Transducers for Titanium Alloy Evaluation*, CP1211, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation Vol.29, (2010).
- [39] P. Łopato, ROZPRAWA DOKTORSKA, Inteligentny system wiroprowadowego badania niemagnetycznych struktur przewodzących, (2008).
- [40] www.zetec.com201006miz-21b. Acessado em 15/08/11.
- [41] www.olympus-ims.comptomniscan-eca. Acessado em 15/08/11
- [42] C. Camerini, G. Psuj, T. Chady, J. Rebello, *The Sigma Phase Evaluation in duplex Stainless Steel Using ECT method*; JAPMED7, (2011)
- [43] T. Chady, T. Lopato, *Multi-Resolution Eddy Current Measurements*, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 26, (2007).
- [44] www.ferroxcube.com. Acessado em 20/09/11.