

SISTEMA DE INSPEÇÃO PARA DETECÇÃO DE TRINCAS DE FADIGA EM  
JUNTAS SOLDADAS DE DUTOS METALURGICAMENTE CLADEADOS

Cesar Giron Camerini

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rebello

Gabriela Ribeiro Pereira

Tomasz Chady

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2018

SISTEMA DE INSPEÇÃO PARA DETECÇÃO DE TRINCAS DE FADIGA EM  
JUNTAS SOLDADAS DE DUTOS METALURGICAMENTE CLADEADOS

Cesar Giron Camerini

TESE 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 DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

---

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.

---

Profa. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

---

Prof. Juan Manuel Pardal, D.Sc.

---

Dr. Sérgio Damasceno Soares, D.Sc.

---

Profa. Adriana da Cunha Rocha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2018

Camerini, Cesar Giron

Sistema de Inspeção para Detecção de Trincas de Fadiga em Juntas Soldadas de Dutos Metalurgicamente Cladeados / Cesar Giron Camerini. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVIII, 110 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rebello

Gabriela Ribeiro Pereira

Tomasz Chady

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 106-110.

1. Ensaio não destrutivo. 2. Dutos cladeados. 3. Trincas de fadiga. I. Rebello, João Marcos Alcoforado *et.al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

*À minha família*

## **Agradecimentos**

Esse trabalho não seria possível sem a ativa participação dos meus orientadores, professores João Marcos Alcoforado Rebello, Gabriela Ribeiro Pereira e Tomasz Chady. Muito obrigado pela orientação, companheirismo, confiança, motivação e paciência ao longo do processo.

Aos colegas e amigos do LNDC e do CENPES que deram contribuições fundamentais para o desenvolvimento do trabalho, dentre os quais destaco: Vitor Manoel, Lucas Braga, Rafael Wagner, João Márcio, Iane Soares, Johanna Pacheco, Tibério Moura e João Vicente.

Aos meus pais, Claudio e Cristina, e aos meus irmãos e suas famílias, Flavia, Murilo, Isabel, Bruno, Isabelle e Lucas, pelo amor, suporte, amizade, conselhos, incentivos e sugestões na vida e neste trabalho.

À minha esposa Mariana, que mesmo não sendo da área, leu, releu e comentou pacientemente vários trechos da tese. Obrigado pelo carinho e por estar sempre disposta a me ajudar com o que fosse preciso. Obrigado pelo entusiasmo constante, mesmo em momentos que eu era só desânimo. Obrigado por todo amor, companheirismo e cumplicidade.

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

## SISTEMA DE INSPEÇÃO PARA DETECÇÃO DE TRINCAS DE FADIGA EM JUNTAS SOLDADAS DE DUTOS METALURGICAMENTE CLADEADOS

Cesar Giron Camerini

Fevereiro/2018

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rebello

Gabriela Ribeiro Pereira

Tomasz Chady

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Os efeitos da combinação de meios corrosivos com carregamentos cíclicos exigem o uso de uma metalurgia especial para produção de petróleo e gás em ambiente *offshore*. Nesse contexto, os dutos fabricados com material cladeado vêm ganhando espaço no cenário nacional. Os dutos cladeados são constituídos de um substrato de aço carbono de alta resistência e baixa liga com um revestimento interno de uma liga resistente à corrosão, combinando assim, excelentes propriedades de resistência mecânica e tenacidade do material de base à resistência à corrosão do revestimento. Devido ao risco do surgimento de trincas de corrosão-fadiga nos dutos é importante que se tenha uma ferramenta de inspeção capaz de identifica-las, principalmente nas regiões mais críticas, caso das soldas circunferenciais. Amostras com juntas soldadas foram fabricadas com entalhes de eletroerosão inseridos na raiz das juntas. Os resultados alcançados com o sistema de inspeção, eletrônica e sensores, desenvolvido no trabalho, demonstraram a viabilidade de aplicar a tecnologia de correntes parasitas para detectar trincas de fadiga em juntas soldadas de dutos cladeados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

INSPECTION SYSTEM FOR FATIGUE CRACK DETECTION IN WELDED  
JOINTS OF METALLURGICALLY CLAD PIPES

Cesar Giron Camerini

February/2018

Advisors: João Marcos Alcoforado Rebello

Gabriela Ribeiro Pereira

Tomasz Chady

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The application of clad material to subsea pipelines is gaining ground in deep water oil exploration. Its bimetallic configuration presents an attractive combination of mechanical strength and corrosion resistance, ensuring the safety and integrity of pipelines that connect the reservoir to oil rig. The clad material for oil exploration consists of a base material, usually carbon steel, inner coated with a thin layer of corrosion resistance alloy (CRA), turning into an attractive economical solution for deep water exploration since only a small portion of the noble anti-corrosive alloy is required. The potential for fatigue cracks to occur in pipeline structures due to cycling loads inherent of offshore oil production, makes necessary have an inspection tool to carry out periodic non destructive inspection in the inner pipe surface. The most critical point of pipeline structures is the circumferential weld and demands special attention during inspection. The results achieved with the inspection system, hardware and sensors, developed in the current work, demonstrate the feasibility to apply eddy current technology to detect fatigue cracks in welded joints of clad pipes.

## Sumário

<b>1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Descrição do problema .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Revisão bibliográfica .....</b>	<b>11</b>
3.1 Revisão Teórica.....	11
3.1.1 Técnica de correntes parasitas.....	11
3.1.2 Plano de impedância, profundidade de penetração, densidade de corrente induzida e lift-off .....	12
3.2 Revisão bibliográfica.....	16
3.2.1 Aplicação da técnica de correntes parasitas para detecção de trincas de fadiga.....	16
3.2.2 Aplicação da técnica de correntes parasitas para detecção de trincas em junta soldada.....	25
3.2.3 Aplicação da técnica de correntes parasitas para inspeção de material cladeado.....	32
3.2.4 Considerações finais sobre a aplicação da técnica de correntes parasitas para detecção de trincas em material cladeado.....	35
<b>4 Considerações práticas e materiais e métodos .....</b>	<b>37</b>
4.1 Considerações práticas para aplicação da técnica de correntes parasitas em ferramentas de inspeção interna para detecção de trincas de fadiga em juntas de dutos cladeados.....	37
4.1.1 Posição de nucleação da trinca e variações geométricas do cordão de solda .....	37
4.1.2 Velocidade de inspeção .....	41
4.1.3 Trinca de fadiga <i>versus</i> entalhe de eletroerosão .....	42
4.1.4 Ponderações finais sobre as considerações práticas para aplicação da técnica de correntes parasitas em ferramentas de inspeção interna para detecção de trincas de fadiga em juntas de dutos cladeados.....	44
4.2 Materiais e métodos.....	44
4.2.1 Testes de viabilidade da aplicação do sensor de correntes parasitas com configuração ortogonal para detecção de trincas em juntas soldadas de material cladeado .....	45
4.2.2 Estudo da representação de trincas de fadiga a partir de entalhes de eletroerosão .....	46

4.2.3	Definição da frequência ótima de operação da sonda para detecção de defeitos .....	48
4.2.4	Testes de velocidade de inspeção para aplicação da técnica em ferramentas de inspeção interna .....	48
4.2.5	Testes com <i>array</i> de sensores com configuração relevante para inspeção de campo.....	51
<b>5</b>	<b>Apresentação e análise dos resultados .....</b>	<b>53</b>
5.1	Testes de viabilidade da aplicação do sensor de correntes parasitas para detecção de trincas em juntas soldadas.....	53
5.1.1	Fabricação dos corpos de prova .....	53
5.1.2	Simulação computacional para avaliação do comportamento das correntes induzidas a partir da configuração ortogonal.....	57
5.1.3	Inspeção de juntas soldadas com sensores de correntes parasitas com configuração ortogonal.....	60
5.2	Definição da frequência ótima de operação da sonda para detecção de defeitos .....	65
5.3	Representação de trincas de fadiga a partir de entalhes de eletroerosão.....	72
5.4	Testes de velocidade de inspeção para aplicação da técnica em ferramentas de inspeção interna.....	78
5.4.1	Otimização dos parâmetros de inspeção.....	80
5.4.2	Dimensionamento da profundidade dos entalhes.....	89
5.5	Testes com <i>array</i> de sensores com configuração relevante para inspeção de campo.....	91
5.5.1	Construção dos sensores ortogonais para testes com <i>array</i> .....	92
5.5.2	Testes com <i>array</i> de sensores com velocidades relevantes e <i>lift-off</i> .....	94
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros.....</b>	<b>104</b>
6.1	Conclusões.....	104
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	105
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>106</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Ilustração de um duto cladeado com substrato em aço carbono API 5L X65 e revestido com liga de níquel, Inconel 625 .....	4
Figura 2.2 – Diagrama comparativo da resistência à corrosão em função da resistência mecânica. Adaptado de [4] .....	4
Figura 2.3 – Macrografia de solda circunferencial de material cladeado após ensaio de corrosão-fadiga. Adaptado de [9] .....	6
Figura 2.4 – Esquemático do detalhe da solda circunferencial com a indicação da região mais suscetível ao surgimento da trinca de corrosão-fadiga. ....	6
Figura 2.5 – Ferramenta autônoma de inspeção interna, <i>pigs</i> . Adaptado de [11]. ....	7
Figura 2.6 – Percorso sônico do ultrassom para inspeção de trinca [17]. ....	9
Figura 3.1 – Princípio da inspeção por correntes parasitas [23].....	12
Figura 3.2 – Profundidade de penetração ( <i>skin depth</i> ) [23]... ..	14
Figura 3.3 <i>Lift-off</i> - Distância entre o corpo de prova sob inspeção e a sonda.....	15
Figura 3.4 - Seção transversal da placa de níquel da série 600 com a trinca de fadiga obtida por Yusa <i>et. al.</i> [28] .....	16
Figura 3.5 - Varreduras da trinca de fadiga com diferentes sondas e frequências [28]... ..	18
Figura 3.6 - Configuração da sonda diferencial uniforme utilizada por Yusa <i>et.al.</i> [28]. Adaptado de [29]. ....	19
Figura 3.7 - Sonda com configuração ortogonal, nomeada de plus point (+ point) pelo autor [30]. Cotas no desenho em milímetros.....	20
Figura 3.8 - Varreduras das trincas de fadiga com diferentes profundidades. Da esquerda para direita: trinca rasa, intermediária e profunda. Adaptado de [30].....	20
Figura 3.9 - Seção transversal dos corpos de prova em aço AISI 316 mostrando as trincas de fadiga obtidas por [30]. Da esquerda para direita, FC2 com 0,8 mm de profundidade, FC1 com 1,1 mm e FC3 com 1,2 mm. ....	21
Figura 3.10 - Vista superior dos entalhes fabricados com as réplicas (à direita) dos formatos dos entalhes, retangular e semicircular [31].....	22
Figura 3.11 - Vista frontal e superior da sonda diferencial utilizada por [31]. ....	22

Figura 3.12 – Extrapolação dos resultados de amplitude dos entalhes de eletroerosão para representação da trinca de fadiga (abertura “zero”) com a atenuação da amplitude do sinal chegando a 35% [31].	23
Figura 3.13 – Ilustração do procedimento utilizado por [32] para relacionar entalhes de eletroerosão com trincas de fadiga. Da esquerda para direita: entalhe de eletroerosão, extrapolação do sinal do entalhe para uma condição de “abertura zero” e, correção no sinal para ajustar o efeito da morfologia das trincas reais.	24
Figura 3.14 – a) sensor com bobinas com configuração ortogonal (adaptado de [33]); e b) ilustração da sonda ortogonal onde é possível visualizar as camadas das bobinas entrelaçadas.	26
Figura 3.15 – Correntes induzidas produzidas por uma bobina (à direita) e produzidas duas bobinas perpendiculares (à esquerda).	26
Figura 3.16 – Resultado da varredura do corpo de prova em aço inoxidável 316L com a sonda de correntes parasitas com configuração ortogonal. Adaptado de [33].	27
Figura 3.17 – Ilustração da aplicação em campo do ensaio. Adaptado de [34].	27
Figura 3.18 – Bloco de calibração com entalhes de eletroerosão com diferentes profundidades. Adaptado de [34].	28
Figura 3.19 Resultado de inspeção do bloco de calibração com entalhes de eletroerosão com diferentes profundidades [34].	29
Figura 3.20 – Resultado de inspeção da junta soldada com trinca transversal à solda [34].	29
Figura 3.21 – Resultado de inspeção em corpo de prova com trinca de 64 mm de comprimento ao longo da solda [34].	30
Figura 3.22 – Ilustração da sonda com configuração ortogonal [35].	31
Figura 3.23 – Sequência de movimentos de inspeção para garantir que possíveis defeitos não estejam à $\pm 45^\circ$ do eixo das bobinas durante inspeção. Adaptado de [35].	31
Figura 3.24 – Esquemático do corpo de prova utilizado [36].	33
Figura 3.25 – Detalhe das trincas de fadiga, fc3, fc4 e fc5. Adaptado de [36].	33

Figura 3.26 – Sonda uniforme utilizada para detecção de trinca de fadiga em solda de Inconel em material cladeado [36] .....	34
Figura 3.27 – Resultado de inspeção das cinco trincas de fadiga e do entalhe de eletroerosão com a sonda uniforme [36] .....	34
Figura 3.28 – Comparação dos valores reais do comprimento das trincas de fadiga com os obtidos a partir dos ensaios: queda de potencial, ultrassom e correntes parasitas [36] .....	35
Figura 4.1 - Ilustração das restrições que inviabilizam a utilização das ferramentas de inspeção disponíveis no mercado; a) seção de um duto cladeado com junta soldada transversal; b) destaque da fatia do duto para apresentação das restrições; c) posição de nucleação da trinca de fadiga; d) seção transversal da solda com a posição da trinca de fadiga e perfil da variação geométrica, linha pontilhada, que indica o percurso a ser desempenhado pelo sensor durante inspeção. ....	38
Figura 4.2 – Posição da trinca na raiz da solda, onde a) trinca antes do cordão de solda; b) trinca após o cordão de solda .....	40
Figura 4.3 – Ilustração do sensor passando pelo defeito antes (a) e depois (b) do cordão de solda com baixa e alta velocidade.....	41
Figura 4.4 – Esquemático do corpo de prova cladeado para testar a viabilidade da aplicação da técnica de correntes parasitas.....	46
Figura 4.5 – Esquemático do dispositivo fabricado para variação da abertura da trinca de fadiga.. ....	47
Figura 4.6 – Ilustrativo do corpo de prova com entalhes de eletroerosão com diferentes aberturas.....	48
Figura 4.7 – KUKA KRC4 – HW, fotografia do braço robótico a ser utilizado para assistir os ensaios com diferentes velocidades. ....	50
Figura 4.8 – Matriz de ensaios combinando velocidades de inspeção com <i>lift-offs</i> .....	50
Figura 4.9 – Esquemático para o sistema de inspeção automatizada.. ....	52
Figura 5.1 - Micrografia da interface de cladeamento do Inconel com o aço carbono (à direita) e gráfico com o perfil da composição química ao longo da interface (à esquerda).....	54

Figura 5.2 – Esquemático simplificado do processo de fabricação do duto cladeado em estudo.....	55
Figura 5.3 – Fotografia do corpo de prova em material cladeado. Seção A-A: seção transversal do entalhe de eletroerosão. Seção B-B: detalhamento do cordão de solda...	56
Figura 5.4 – Corpos de prova cladeados com entalhes de eletroerosão com diferentes profundidades. ....	56
Figura 5.5 – Modelo utilizado para a simulação da sonda ortogonal. ....	58
Figura 5.6 – Resultante das correntes induzidas geradas pelas duas bobinas sobre a chapa com a sonda posicionada exatamente sobre o entalhe. ....	59
Figura 5.7 – Comportamento das correntes induzidas devido a configuração ortogonal e conexão diferencial entre as bobinas. Onde: 1) apresenta as linhas das correntes geradas pelas bobinas ortogonalmente dispostas; 2) a região de influência das mesmas correntes induzidas; e 3) a interação da conexão diferencial que resulta nos eixos de máxima e mínima resposta do sensor.....	59
Figura 5.8 – a) Sonda de correntes parasitas com configuração ortogonal utilizada para inspeção do corpo de prova fabricado e b) Equipamento de correntes parasitas <i>Omniscan MX ECA</i> da Olympus .....	60
Figura 5.9 – Percurso do sensor durante a inspeção automatizada com a indicação da posição do início e término da inspeção. ....	61
Figura 5.10 – C-Scan do corpo de prova cladeado com o resultado da componente imaginária da impedância elétrica, reatância indutiva. Em destaque o entalhe de eletroerosão inserido.....	61
Figura 5.11 – C-Scan do corpo de prova cladeado com o resultado da componente real da impedância elétrica, resistência. Em destaque a posição do entalhe de eletroerosão inserido .....	62
Figura 5.12 – Análise das assinaturas da componente resistiva dos sinais de inspeção sobre o entalhe de eletroerosão e fora do entalhe.....	63
Figura 5.13 – Análise das assinaturas da componente indutiva dos sinais de inspeção sobre o entalhe de eletroerosão e fora do entalhe.....	64
Figura 5.14 – Corpo de prova fabricado para definição da frequência ótima de inspeção.. ..	65

Figura 5.15 – Senóides com diferentes frequências de oscilação (1, 2, 5, 10, 20 e 50 kHz, respectivamente).....	67
Figura 5.16 – Sinal de resposta e inspeção do corpo de prova com entalhe de eletroerosão com a sonda alimentada com o sinal da figura 5.15. ....	68
Figura 5.17 – Sinal de excitação da sonda ortogonal obtido a partir da sintetização das frequências apresentadas na figura 5.14. ....	68
Figura 5.18 – Análise no domínio da frequência do sinal de resposta de inspeção, onde é possível visualizar a principal magnitude do espectro em 50kHz.....	69
Figura 5.19 – Variação do módulo da impedância em função da frequência de excitação. A partir do espectro de frequência do sinal de resposta da inspeção da sonda é possível definir a frequência ótima de inspeção. ....	70
Figura 5.20 – Análise da resposta em frequência da inspeção do corpo de prova, onde é possível identificar a faixa de operação do sensor entre 100 e 600 kHz e definir a frequência ótima para inspecionar descontinuidades superficiais em Inconel 625.....	71
Figura 5.21 – Profundidade de penetração em função da frequência do ensaio para a liga de Níquel Inconel 625.....	73
Figura 5.22 – Corpo de prova fabricado em Inconel 625 com 10 entalhes de eletroerosão com aberturas variando entre o intervalo de 0,16 e 0,40 mm.....	74
Figura 5.23 – Detalhe da trinca de fadiga obtida no trabalho.....	75
Figura 5.24 – Corpo de prova com dispositivo para controle de abertura da trinca de fadiga.. ....	76
Figura 5.25 – a) Variação de abertura da trinca de fadiga à medida que se aumenta o torque no parafuso do dispositivo para controle de abertura. b) Diferentes aberturas alcançadas com o processo de eletroerosão.....	76
Figura 5.26 – Amplitude do sinal de inspeção em função da abertura das descontinuidades.....	78
Figura 5.27 – Resultado de reatância indutiva e resistência para diferentes velocidades de inspeção.. ....	80
Figura 5.28 – Parâmetros que devem ser definidos para se iniciar uma inspeção por correntes parasitas. Em destaque os parâmetros que serão estudados para aprimoramento da capacidade de detecção da trinca de fadiga.....	82

Figura 5.29 – Vetor de amplitude do sinal ou $ Z $ .	83
Figura 5.30 – Influência do ganho vertical na amplitude do vetor de impedância.	83
Figura 5.31 – Exemplificação da rotação de um vetor no plano de impedância complexa.	84
Figura 5.32 – Comparação entre o sinal de varredura da solda em vermelho (fora do entalhe) com o sinal do entalhe em azul. A seta em azul escuro indica o vetor máximo de impedância em cada um dos sinais.	86
Figura 5.33 – Superfície de resposta (delta de detecção) para diferentes combinações de rotação e ganho vertical.	87
Figura 5.34 – Resultado da otimização de parâmetros de rotação e ganho vertical. No C-scan (a) foram utilizados os parâmetros inicialmente definidos para inspeção do corpo de prova cladeado, enquanto no (b) utilizou-se os parâmetros otimizados para diferenciar o entalhe do cordão de solda	88
Figura 5.35 – Superfície de resposta de otimização dos parâmetros para os copos de prova com diferentes profundidades. Sendo: a) corpo de prova com entalhe de 1,0 mm de profundidade, b) corpo de prova com entalhe de 1,5 mm de profundidade, c) corpo de prova com entalhe de 2,0 mm de profundidade e d) corpo de prova com entalhe de 3,0 mm de profundidade.	90
Figura 5.36 – Dimensionamento dos entalhes com o valor máximo do delta de detecção em função a profundidade dos entalhes.	91
Figura 5.37 – Bobinas fabricadas para o teste com <i>array</i> de sensores.	92
Figura 5.38 – Bobinadeira CNC para fabricação das sondas.	93
Figura 5.39 – Esquemático das bobinas da sonda ortogonal, onde em destaque é apresentado uma das principais dificuldades encontradas no processo de fabricação, sobreposição das camadas das bobinas	93
Figura 5.40 – Ilustração da inspeção com array de sensores.	95
Figura 5.41 – (Esquerda) Chapa cladeada utilizada nos testes com array de sensores; (Direita) A representação da inspeção circunferencial.	96
Figura 5.42 – Velocidade de inspeção igual a 0,2 m/s com <i>lift-off</i> de 0,0 mm.	97
Figura 5.43 – Velocidade de inspeção igual a 0,5 m/s com <i>lift-off</i> de 0,0 mm.	97

Figura 5.44 – Velocidade de inspeção igual a 1,0 m/s com <i>lift-off</i> de 0,0 mm .....	97
Figura 5.45 – Velocidade de inspeção igual a 0,5 m/s com <i>lift-off</i> de 0,5 mm .....	98
Figura 5.46 – Velocidade de inspeção igual a 1,0 m/s com <i>lift-off</i> de 0,5 mm .....	98
Figura 5.47 – Velocidade de inspeção igual a 0,5 m/s com <i>lift-off</i> de 1,0 mm .....	98
Figura 5.48 – Velocidade de inspeção igual a 1,0 m/s com <i>lift-off</i> de 1,0 mm .....	99
Figura 5.49 – Ilustração da influência da utilização dos parâmetros otimizados. Imagem à esquerda apresenta o resultado para 1,0 m/s e <i>lift-off</i> de 1,0 mm fazendo uso dos parâmetros ótimos; Imagem à direita apresenta o resultado para mesma situação com os parâmetros não otimizados .....	100
Figura 5.50 – Representação da inspeção com alta resolução.....	101
Figura 5.51 – Velocidade de inspeção de 0,2 m/s .....	101
Figura 5.52 – Velocidade de inspeção de 0,5 m/s .....	101
Figura 5.53 – Velocidade de inspeção de 1,0 m/s .....	102
Figura 5.54 – Influência da velocidade na detecção do entalhe de eletroerosão adjacente à solda a 0,2 m/s (a), a 5 m/s (b) e a 1,0 m/s (c) sem <i>lift-off</i> . .....	103

## **Lista de Tabelas**

Tabela 2.1 – Aplicação, vantagens e limitações das técnicas mais aplicadas em ferramentas de inspeção de dutos que operam offshore.....	8
Tabela 5.1 – Parâmetros de construção das bobinas. ....	93
Tabela 5.2 – Medidas de impedância e indutância das bobinas fabricadas.....	94

## Lista de siglas e notações

$\delta$	Profundidade de penetração
V	Tensão elétrica
I	Corrente elétrica
$f$	Frequência de operação
$J$	Densidade de corrente elétrica
$U_{ind}$	Voltagem induzida
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\sigma$	Condutividade Elétrica
$R$	Resistência elétrica
$j$	Operador complexo
$X_c$	Reatância Capacitiva
$X_L$	Reatância Indutiva
$Z$	Impedância elétrica
$t$	Tempo
$\varphi$	Fase
$\phi$	Fluxo magnético
$H$	Henry
ARBL	Alta Resistência Baixa Liga
CRA	<i>Corrosion Resistant Alloy</i>
PEC	<i>Pulsed Eddy Current</i>
EMAT	<i>Electromagnetic Acoustic Transducer</i>
SLOFEC	<i>Saturated Low Frequency Eddy Current</i>
MFL	<i>Magnetic Flux Leakage</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
CT	<i>Compact Tension</i>
EBSA	<i>Electron backscatter diffraction</i>
GTAW	<i>Gas-Shielded Tungsten Arc Welding</i>

## 1. Introdução

Em ambiente *offshore*, a conexão entre os poços de petróleo e as unidades flutuantes de produção é realizada através de dutos verticais, chamados *risers*, e dutos que correm pelo leito marinho, *flow lines*. Os efeitos da combinação de meios corrosivos com carregamentos cíclicos exigem o uso de uma metalurgia especial para fabricação dos dutos empregados para produção de petróleo e gás. Neste contexto, visando atender os desafios da engenharia, a indústria siderúrgica vem aprimorando a evolução de aços especiais, conseguindo materiais de alto desempenho ao adicionar teores de cromo, níquel e molibdênio na liga básica de aços carbono, ou ao combinar aços com diferentes propriedades a partir de técnicas de cladeamento.

Os aços que passam pelo processo de cladeamento são chamados de aços cladeados. E, apesar do amplo histórico de aplicação *offshore*, sobretudo no mar do Norte, tais aços vêm recentemente ganhando margem no cenário nacional, pois conseguem suportar maiores esforços durante operação, conservando o mesmo nível de resistência à corrosão dos aços de uma liga única especial. Sendo comumente constituídos de um substrato de aço carbono com um revestimento de uma liga resistente à corrosão, os aços cladeados combinam, dessa forma, excelentes propriedades de resistência mecânica e tenacidade do material de base à resistência à corrosão do revestimento [1-4].

Para a construção de linhas de dutos rígidos submarinos que interligam as unidades de produção flutuante - plataformas ou navios FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*) -, aos equipamentos no leito marinho, é necessário conectar diversos segmentos de dutos a partir de soldas circunferenciais. No caso de dutos cladeados as soldas circunferenciais são as regiões que demandam maior atenção durante a operação, uma vez que são concentradores de tensão e estão expostas ao processo natural de fadiga inerente às operações *offshore*, como correntes, ondulações, movimentação da plataforma, entre outros [5].

Devido ao processo natural de fadiga que as linhas *offshore* estão submetidas, ao agressivo ambiente de produção e ao risco consequente do surgimento de trincas de corrosão-fadiga nos dutos, é importante que se tenha uma ferramenta de inspeção capaz de identificar tais trincas, principalmente nas regiões mais críticas para nucleação, caso das soldas circunferenciais. As ferramentas para inspeção interna de dutos rígidos

disponíveis no mercado, no entanto, não atendem a detecção de trincas de corrosão-fadiga em juntas circunferenciais de dutos cladeados, o que motiva o desenvolvimento do presente trabalho.

Este estudo contextualiza a razão pela qual as ferramentas hoje disponíveis no mercado não atendem à presente demanda, e definiu o desenvolvimento de um sistema de inspeção interna específico, baseado na técnica não destrutiva de correntes parasitas, para detectar trincas de fadiga em juntas soldadas de dutos cladeados. O desenvolvimento incluiu o projeto e a análise de sensores de correntes parasitas para aplicação no problema, otimização dos parâmetros de inspeção, procedimentos de medição e análise de dados, e projeto de matriz de sensores para testes em ambiente relevante. O resultado alcançado mostrou a viabilidade de se utilizar a técnica de correntes parasitas para detecção de trincas de fadiga em juntas soldadas.

## 2. Descrição do problema

As conexões entre os poços de petróleo e gás e as unidades flutuantes de produção, como plataformas semissubmersíveis e FPSOs (*Floating Production, Storage and Offloading*), são realizadas através de dutos verticais, chamados *risers* e dutos que correm pelo leito marinho, *flow lines*. Em ambiente *offshore*, os efeitos da combinação de meios corrosivos com carregamentos cíclicos, como variação de maré, ondulações e os movimentos da plataforma, exigem o uso de uma metalurgia específica para fabricação de tais dutos, garantindo assim, uma operação segura no transporte do petróleo e gás mesmo quando impregnados com contaminantes agressivos como  $H_2S$  e  $CO_2$ , advindos de poços em grandes laminais d'água.

Os *risers* do tipo rígido são comumente fabricados em aço carbono de alta resistência e baixa liga (ARBL) e dependendo do nível de resistência mecânica e à corrosão exigido durante operação, podem apresentar um elevado grau API [6], uma alta espessura de parede ou uma camada de revestimento interno com uma liga de alta resistência à corrosão. Os dutos que apresentam revestimento com uma liga de alta resistência à corrosão (normalmente referenciada pela sigla em inglês, CRA, *corrosion resistant alloy*) são chamados de dutos cladeados e apresentam a vantagem de conseguir suportar grandes esforços durante operação, conservando o mesmo nível de resistência à corrosão dos dutos fabricados a partir de uma liga única especial. Os dutos cladeados são normalmente constituídos de um substrato de aço carbono com um revestimento interno de uma CRA, figura 2.1, combinando assim, excelentes propriedades de resistência mecânica e tenacidade do material de base à elevada resistência à corrosão do revestimento [1-3], tornando-se, dessa forma, uma atraente solução econômica, uma vez que somente uma fina camada da liga nobre do revestimento é utilizada [2].

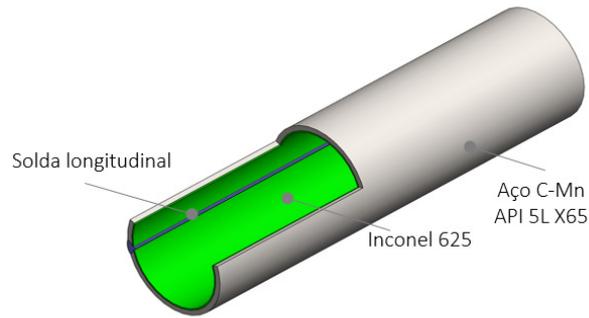


Figura 2.1: Ilustração de um duto cladeado com substrato em aço carbono API 5L X65 e revestido com liga de níquel, Inconel 625.

A figura 2.2 (adaptado de [4]), apresenta um diagrama que relaciona a resistência mecânica com a resistência à corrosão de diferentes materiais, onde é possível observar que o material cladeado ao combinar as propriedades do aço carbono de ARBL com as das ligas de níquel, por exemplo, alcança as melhores características de resistência mecânica e corrosão.

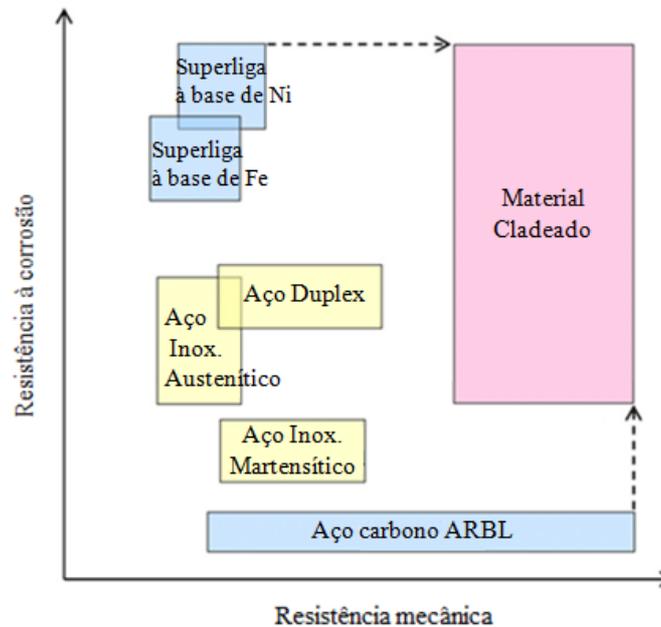


Figura 2.2: Diagrama comparativo da resistência à corrosão em função da resistência mecânica. Adaptado de [4].

As linhas rígidas submarinas são formadas a partir de segmentos de dutos que são conectados entre si através de soldas circunferenciais. Devido ao processo natural de fadiga que as linhas *offshore* estão submetidas, ao agressivo ambiente de produção e ao risco consequente do surgimento de trincas de corrosão-fadiga nos dutos, é importante que se tenha uma ferramenta de inspeção capaz de identificar tais trincas, principalmente nas regiões mais críticas para nucleação, que é o caso das soldas circunferências [5, 7 e 8]. Cerqueira [9] divulgou o resultado de um ensaio de corrosão-fadiga em laboratório, onde é possível visualizar na figura 2.3, o ponto de nucleação da trinca na raiz da solda exatamente na interface do metal de solda com o metal de base.

No caso de dutos cladeados, como o substrato e o revestimento possuem diferentes potenciais de corrosão, é crucial que se identifique as trincas de corrosão-fadiga em seu estágio inicial, pois caso a trinca se propague pela CRA alcançando o substrato de aço carbono e expondo ambos os materiais ao meio corrosivo, um agressivo par galvânico será formado, acelerando exponencialmente o processo de corrosão-fadiga. A figura 2.4 apresenta a partir de uma ilustração do duto a região mais crítica para o surgimento de trincas, interface da raiz da solda com a CRA e, portanto, a região de principal interesse para inspeção.

Jones *et.al.* [10] apresentaram um estudo experimental sobre o comportamento a fadiga de dutos cladeados principalmente durante o processo de lançamento das linhas submarinas pelo método *reeling*<sup>1</sup>. Dentre os diversos materiais avaliados como revestimento, definiu-se o Inconel 625 como o mais indicado para revestir os dutos cladeados, devido ao aumento de resistência à fadiga conferido à junta.

---

<sup>1</sup> Método de lançamento linhas subamrinas. A linha é fabricada em terra e estocada em carretéis de grande diâmetro no convés da embarcação para transporte e instalação. Dentre as vantagens de se utilizar este método, destacam-se: alta velocidade de instalação, menor custo e melhor qualidade das soldas.

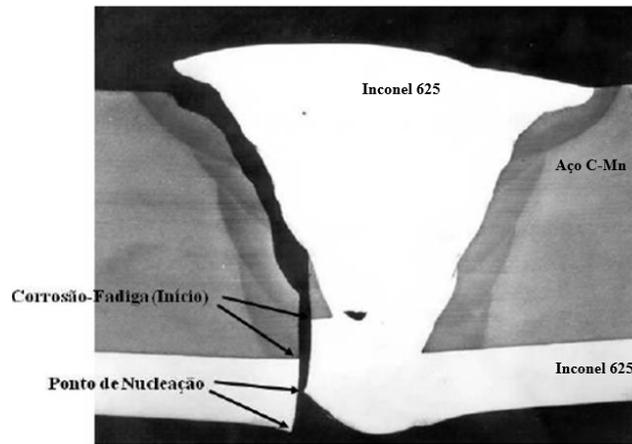


Figura 2.3: Macrografia de solda circunferencial de material cladeado após ensaio de corrosão-fadiga. Adaptado de [9].

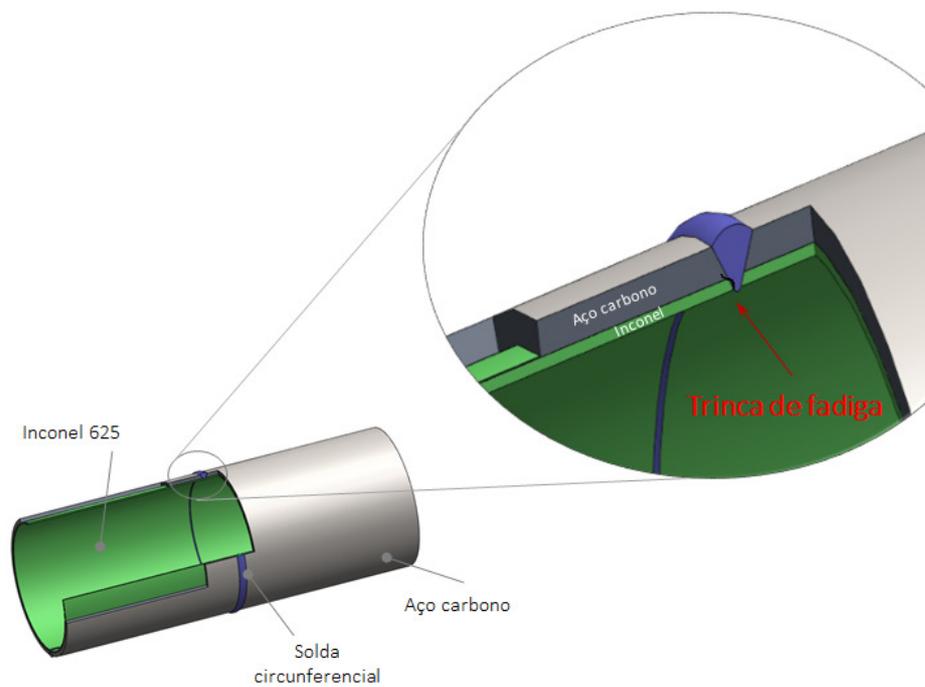


Figura 2.4: Esquemático do detalhe da solda circunferencial com a indicação da região mais suscetível ao surgimento da trinca de corrosão-fadiga.

Diferentes técnicas não destrutivas estão disponíveis para inspeção interna de dutos a partir de ferramentas do tipo *pigs*. Os *pigs* são dispositivos que se deslocam pelo interior dos dutos, realizando uma tarefa predeterminada, geralmente propulidos pelo

próprio fluido bombeado e podem ser instrumentados com diferentes técnicas de inspeção. A figura 2.5 apresenta uma imagem de um *pig* utilizado pela indústria. Para detecção de defeitos, Freire *et.al.* [11] destaca a instrumentação com as técnicas de Ultrassom convencional e MFL (*Magnetic Flux Leakage*), já consolidadas no mercado com amplo histórico de sucesso em operações de campo. Entretanto, as técnicas de inspeção aqui destacadas são designadas principalmente para detecção de corrosão generalizada, perda de espessura e amassamento [11]. A detecção de trincas junto ao cordão de solda a partir de tais técnicas, por sua vez, é uma atividade complexa de ser realizada com as ferramentas disponíveis no mercado, pois além da pequena abertura das trincas de fadiga, o que dificultariam o campo de fuga no caso do MFL, os sensores teriam a difícil tarefa de separar dois sinais de locais contíguos: trinca de fadiga e o excesso de penetração da raiz do cordão de solda. Outras técnicas, como EMAT (*Electromagnetic Acoustic Transducer*), SLOFEC (*Saturated Low Frequency Eddy Current*), PEC (*Pulsed Eddy Current*), são também aplicadas em *pigs* e outras ferramentas de inspeção de dutos [12]. A tabela 2.1 apresenta um resumo com as principais técnicas de inspeção aplicadas em dutos *offshore* com as respectivas vantagens e limitações.

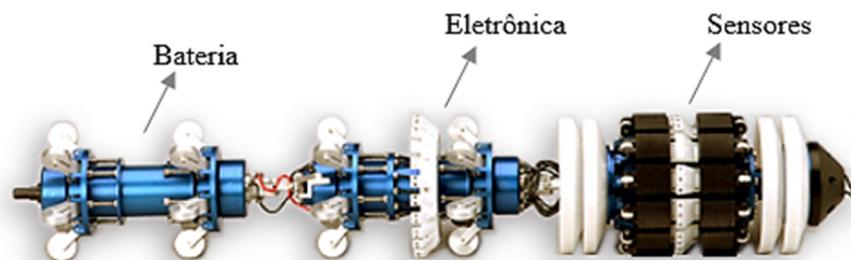


Figura 2.5: Ferramenta autônoma de inspeção interna, *pigs*. Adaptado de [11].

<b>Técnica</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Vantagens e limitações</b>	<b>Comentários</b>
MFL	Detecção de corrosão generalizada em dutos e tanques de armazenamento.	Rápida varredura, não atinge grandes espessuras de inspeção; não discrimina defeitos internos e externos.	Ferramenta versátil e de instrumentação simples. A técnica possui alta eficiência na detecção de defeitos, porém baixa capacidade de dimensionamento [11]. Não detecta trincas.
Ultrassom convencional	Detecção de corrosão generalizada, pites e trincas principalmente em oleodutos.	Dimensionamento preciso dos defeitos; precisa de acoplante durante inspeção.	Cabeçotes angulares conseguem identificar a presença de determinadas trincas até mesmo em juntas soldadas.
PEC	Detecção de corrosão generalizada principalmente em gasodutos.	Consegue inspecionar mesmo com grandes camadas de revestimento (200 mm); não necessita de acoplante [12].	Poucos equipamentos comerciais. Técnica utilizada para inspeção de equipamentos com camadas de revestimentos. Não detecta trincas.
EMAT	Detecção de corrosão generalizada, pites e trincas principalmente em gasodutos [12].	Dimensionamento preciso; não necessita de acoplante; exige que o material inspecionado seja metálico.	Cabeçotes angulares conseguem identificar a presença de determinadas trincas até mesmo em juntas soldadas. Eficiente para detecção de trincas de corrosão sob tensão no metal base [13-15].
SLOFEC	Detecção de corrosão generalizada e pites em dutos e tanques de armazenamento.	Capacidade de inspecionar grandes espessuras (30 mm) e grandes camadas de revestimento [16].	Poucos equipamentos comerciais. A técnica possui alta eficiência na detecção de defeitos, porém baixa capacidade de dimensionamento. Não detecta trincas.

Tabela 2.1: Aplicação, vantagens e limitações das técnicas mais aplicadas em ferramentas de inspeção de dutos que operam *offshore*.

Conforme apresentado pela tabela 2.1, as técnicas de Ultrassom convencional e EMAT são as mais indicadas para detecção de trincas em dutos. Nos trabalhos publicados por Albright [13], Kenneth *et.al.* [14] e Ginten *et.al.* [15], a principal aplicação destas técnicas é para detecção de trincas de corrosão sob tensão, porém, apesar dos excelentes resultados alcançados, a detecção foi realizada somente no metal

base de dutos em aço carbono. Em adição, Reber e Beller [17] publicaram um trabalho sobre detecção de trincas com *pigs* em juntas soldadas em dutos de aço carbono. Pelo esquemático do percurso sônico e as múltiplas reflexões presentes no interior do material (figura 2.6), nota-se que para a aplicação em dutos cladeados onde se tem o material de revestimento, que representa uma interface a mais de reflexão para o percurso sônico, a detecção se torna ainda mais complicada para essas técnicas. Conforme indicado por Cerqueira [9] e TWI [18], a técnica ultrassônica mais eficiente para identificar defeitos em juntas soldadas de material cladeado é o Phased Array, sendo inclusive a técnica aplicada durante fabricação para garantia da qualidade [19]. No entanto, sua aplicação exige um posicionamento cuidadoso do transdutor no material, alinhando-o próximo ao reforço da solda a partir da parede externa do duto [18], o que dificultaria a aplicação em ferramentas de inspeção interna autônoma, ademais, tais ferramentas exigem uma velocidade rápida e precisa de resposta dos sensores com uma quantidade limitada de dados. A técnica de Phased Array, exatamente por ser de alta precisão e rica em informações, fornece uma grande quantidade de dados, o que demandaria uma memória com muito espaço de armazenamento na eletrônica da ferramenta de inspeção autônoma, além de um tempo grande de coleta destes dados.

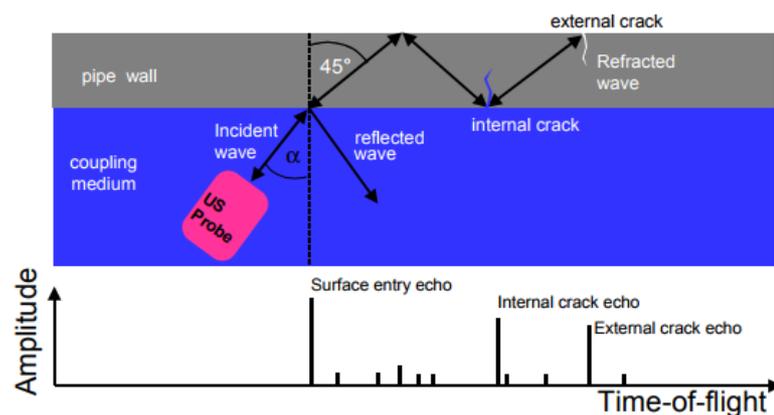


Figura 2.6: Percurso sônico do ultrassom para inspeção de trinca [17].

Dado a dificuldade de detectar trincas em juntas soldadas a partir das técnicas hoje disponíveis no mercado, o presente trabalho propõe a aplicação da técnica de

correntes parasitas para identificar trincas de corrosão-fadiga na raiz de juntas soldadas de dutos fabricados com material cladeado. Sendo o duto cladeado normalmente revestido com uma fina camada (em geral 3 mm) de uma liga inoxidável de característica paramagnética e, sendo as trincas de corrosão-fadiga superficiais (tendo como referência a parede interna do duto). A técnica de correntes parasitas que possui como característica a detecção de trincas e micro trincas superficiais [20-22], se apresenta com elevado potencial para ser aplicada ao problema. Além disso, os sensores de correntes parasitas têm geometrias pequenas o que facilita o arranjo e distribuição ao longo da ferramenta, e os dados de inspeção ocupam poucos *bytes* na memória da eletrônica embarcada visto que somente valores de amplitude e fase precisam ser armazenados. Como a técnica deverá ser utilizada em ferramentas de inspeção autônomas, como *pigs*, as quais possuem uma velocidade de operação entre 0,5 - 4,0 m/s, o método de correntes parasitas também se mostra promissor, uma vez que pode ser aplicado em altas velocidades. Mas para isto é necessário que a técnica de correntes parasitas sugerida tenha a capacidade de identificar as trincas na raiz das soldas operando dentro do intervalo de velocidade de navegação das ferramentas aplicadas em campo. Para tanto, para que seja viável aplicá-la em campo, é necessário que se tenha o controle de todo o sistema de inspeção, governando desde os parâmetros de construção dos sensores, determinando a configuração das bobinas, indutância, frequência de operação, até a eletrônica de excitação, processamento e transmissão dos dados.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o estudo de um sistema completo para inspeção de juntas soldadas de dutos cladeados, onde os sensores de correntes parasitas foram desenvolvidos de maneira dedicada ao problema sendo testados com uma eletrônica específica em velocidades de inspeção relevantes para aplicação em campo.

## 3. Revisão Bibliográfica

### 3.1 Revisão teórica

#### 3.1.1 Técnica de 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 nos princípios de indução eletromagnética.

A técnica de inspeção por correntes parasitas largamente utilizada pela indústria para inspeção de equipamentos, se originou com a descoberta de Michael Faraday do eletromagnetismo em 1831. Entretanto, a primeira aplicação da técnica em alto nível deu-se por Graham Bell na tentativa de localizar uma bala de revólver alojada no corpo do presidente dos Estados Unidos James Garfield em 1882. Somente por volta de 1930 iniciou-se a utilização da técnica como uma simples forma de separar metais. As aplicações industriais mais sofisticadas começaram a ser difundidas entre os anos 1950 e 1960 quando Dr. Friedrich publicou suas pesquisas sobre caracterização dos materiais e o conceito do diagrama de impedância, sendo usada inicialmente na indústria aeronáutica e nuclear [23].

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 é gerado. Ao aproximar esta bobina de uma superfície de um material condutor elétrico, o campo gerado pela bobina induz uma corrente elétrica no material, nomeada como correntes parasitas. Estas correntes geradas dão origem a um novo campo magnético, conhecido como campo secundário, que se opõe às variações do campo primário. A interação entre os campos primário e secundário modifica a impedância elétrica da bobina e tal variação de impedância é a grandeza física monitorada durante o ensaio.

A figura 3.1 ilustra o princípio de funcionamento 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 pela bobina; ao aproximar a bobina de um

material condutor correntes parasitas são induzidas no material; e esta corrente induzida gera um campo secundário que interage com o campo primário alterando a impedância elétrica da bobina.

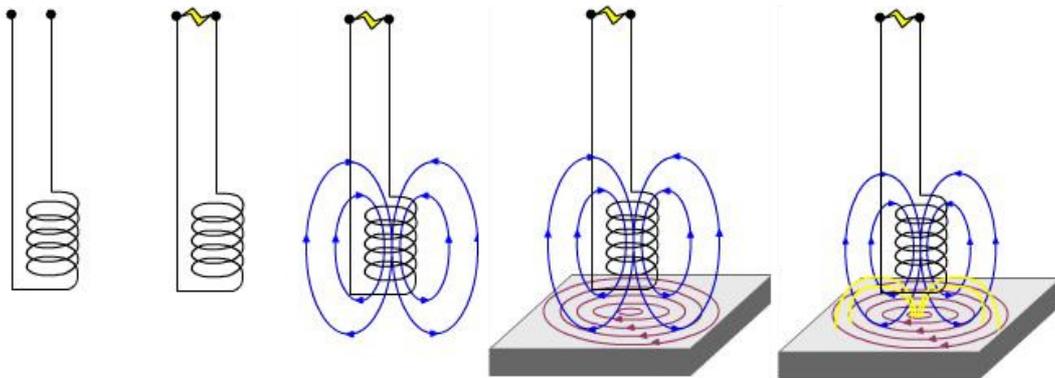


Figura 3.1: Princípio da inspeção por correntes parasitas [23].

### 3.1.2 Plano de impedância, profundidade de penetração, densidade de corrente induzida e *lift-off*

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 ( $\Omega$ ) e pode ser expressa como um número complexo, possuindo uma parte real, equivalente a componente resistiva ( $\Omega$ ), e uma parte imaginária, dada pela reatância capacitiva ( $X_C$ ) e indutiva ( $X_L$ ). Em uma sonda de correntes parasitas a influência da reatância capacitiva é desprezível quando se opera em faixas de frequência até alguns MHz [24 e 25], restando normalmente somente a reatância indutiva para compor a parte complexa da impedância.

Utiliza-se o termo “plano de impedância” para designar a forma como o equipamento de correntes parasitas apresenta os resultados para o operador. A denominação é estritamente correta para uma sonda que tenha apenas uma bobina, no entanto, o termo também é usado para análise de resultados em situações com mais de

uma bobina. O que o equipamento realmente mede é a amplitude e a fase de um sinal recebido, em relação ao sinal de excitação da bobina [26].

Uma das grandes vantagens da técnica de correntes parasitas sobre outros métodos não destrutivos é o fato de não necessitar de um contato físico entre a bobina e a peça. Entretanto, uma limitação da técnica é a capacidade de penetração no material inspecionado. Em materiais espessos e/ou com alta permeabilidade magnética, a aplicação da técnica de correntes parasitas implica na inspeção somente das camadas superficiais. Esta limitação de penetração é conhecida como efeito pelicular, ou do inglês, *skin depth* [23]. A profundidade na qual a intensidade de corrente é reduzida a 36,8% ( $1/e * 100\%$ ) do seu valor superficial é definida como profundidade de penetração padrão,  $\delta$ . O valor de  $\delta$  é dado pela equação 3.1:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad 3.1$$

Onde:

$f$  é a frequência [Hz];

$\mu$  é a permeabilidade magnética [Tm/A];

$\sigma$  é a condutividade [S/m].

Observando-se a figura 3.2, pode-se verificar a influência da frequência do ensaio, da condutividade elétrica e da permeabilidade magnética sobre a profundidade de penetração. Na imagem à esquerda é ilustrado as correntes parasitas geradas em um material que possui alta permeabilidade magnética e condutividade elétrica, sendo este inspecionado com uma sonda operando em alta frequência. O resultado de tal configuração é uma baixa profundidade de penetração das correntes induzidas. Na imagem à direita a situação é o inverso, baixa permeabilidade magnética e condutividade elétrica do material, além de baixa frequência de operação da sonda, resultando em um maior alcance 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 conseqüentemente a sensibilidade da sonda. Muitas vezes para se alcançar uma maior sensibilidade da sonda é aumentada a frequência de operação, para que se tenha uma maior densidade de corrente induzida na superfície.

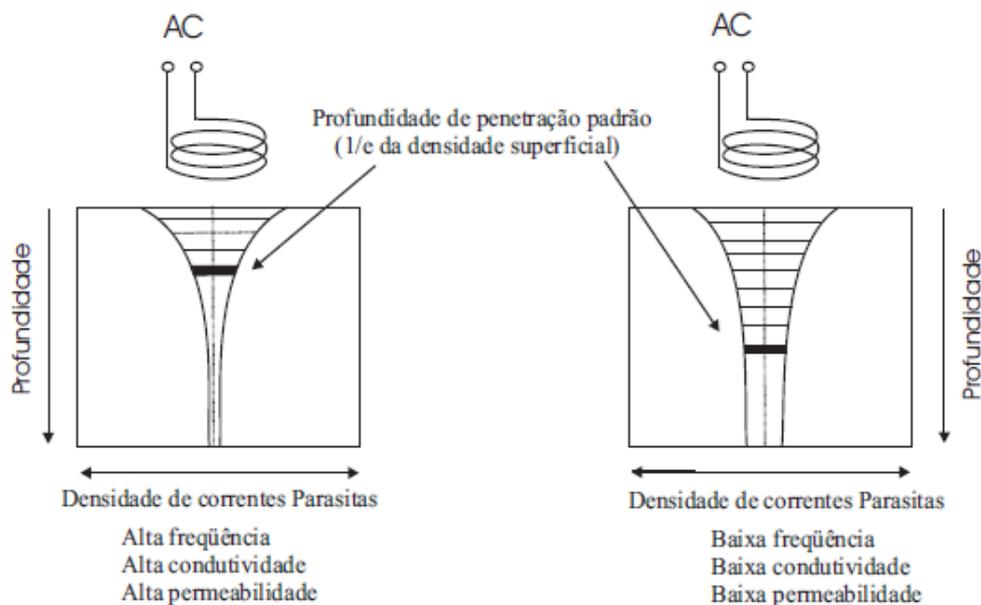


Figura 3.2: Profundidade de penetração (*skin depth*) [23].

A equação 3.2 demonstra como a voltagem induzida ( $U_{ind}$ ) se relaciona com a variação do fluxo do campo magnético e a frequência do ensaio, onde é possível perceber que quanto maior a frequência do ensaio, maior é a voltagem induzida. A equação 3.3, lei Ohm, por sua vez, apresenta a relação entre a voltagem, a resistência e a corrente do sistema, e, sendo a resistência do material de inspeção constante, pode-se afirmar que a voltagem induzida é igual à corrente induzida. Por fim, a equação 3.4 apresenta como a densidade de corrente induzida ( $J$ ) se relaciona com a variação da corrente induzida ( $dI$ ) e da área transversal da peça em inspeção ( $da_{\perp}$ ) [27]. Como normalmente a geometria da peça é constante sob o ponto de vista das correntes induzidas, assume-se que a densidade de corrente induzida é igual à variação da corrente induzida. Dessa forma demonstra-se que quanto maior a frequência de

operação maior a densidade de corrente induzida e consequentemente maior a sensibilidade das sondas de correntes parasitas.

$$U_{ind} = \frac{d\phi}{dt} \quad 3.2$$

$$V = RI \quad 3.3$$

$$J = \frac{dI}{da_{\perp}} \quad 3.4$$

Além da dificuldade de grandes penetrações no material inspecionado, o ensaio de correntes parasitas apresenta 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 3.3. 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 dos casos 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.

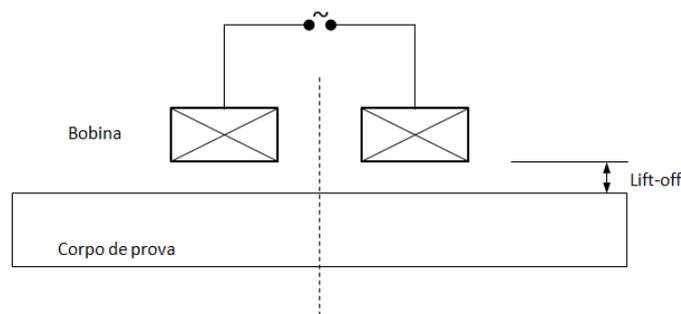


Figura 3.3: *Lift-off* - Distância entre o corpo de prova sob inspeção e a sonda.

## 3.2 Revisão bibliográfica

### 3.2.1 Aplicação da técnica de correntes parasitas para detecção de trincas de fadiga

Na literatura encontram-se disponíveis diversos trabalhos que consideram a técnica de correntes parasitas para a detecção de trincas em materiais metálicos. Yusa *et. al.* [28] utilizaram a técnica para detectar trincas de fadiga no metal base de uma liga de níquel da série 600. Quatro inspeções foram realizadas com as seguintes sondas: absoluta *pancake* operando em 100 e 400 kHz, emissão-recepção diferencial operando em baixa frequência, 10 e 40 kHz, emissão-recepção diferencial operando em alta frequência, 100 e 400 kHz, e diferencial *plus point* operando em 100 e 400 kHz, esta última também conhecida como sonda ortogonal. As trincas foram fabricadas em uma máquina de fadiga com apoio em três pontos. No corpo de prova foi inserido um entalhe de eletroerosão para facilitar a nucleação das trincas, e, após o seu crescimento até o tamanho desejado, foi retirado o entalhe por usinagem. A figura 3.4 apresenta o resultado final da trinca de fadiga enquanto a figura 3.5 apresenta o resultado de inspeção do corpo de prova com os sensores utilizados.

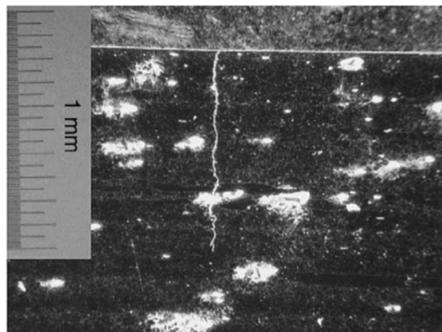


Figura 3.4: Seção transversal da placa de níquel da série 600 com a trinca de fadiga obtida por Yusa *et. al.*[28].

O trabalho em estudo não detalhou a configuração e o funcionamento das sondas utilizadas, o que, numa primeira análise, dificulta o completo entendimento dos

resultados apresentados. Visando esclarecer os resultados da figura 3.5, se faz necessário uma breve descrição sobre a configuração e o modo de operação das sondas utilizadas por Yusa *et. al.* [28].

A sonda absoluta *pancake* possui o arranjo mais simples dentre as diversas configurações possíveis de sondas de correntes parasitas. Consiste em uma bobina cilíndrica com núcleo de um material dielétrico ou ferrítico (entreferro), alimentada por uma corrente alternada, onde o sinal de inspeção corresponde à variação da impedância elétrica da bobina. O resultado de inspeção pela sonda absoluta é apresentado pelo gráfico 3.5a, e, conforme demonstrado pelo resultado, a presença da trinca provoca variações na impedância da bobina, sendo a região central do defeito a posição de maior variação da impedância, ou seja, maior valor de amplitude na varredura.

A sonda emissão-recepção diferencial, denominada pelo autor como sonda uniforme (*uniform eddy current probe*), cujos resultados estão nos gráficos 3.5b e c possui uma configuração com arranjos de bobinas. Apesar do autor não ter colocado figuras da sonda, com o objetivo de facilitar o entendimento, buscou-se na literatura trabalhos que utilizaram uma configuração semelhante. A figura 3.6 apresenta a configuração da sonda uniforme utilizada por Koyama *et.al.* [29], onde é possível visualizar a bobina de excitação, ou emissão, e as bobinas de recepção. Nesta configuração da sonda emissão-recepção, a bobina de excitação induz um fluxo de corrente uniforme abaixo da sonda onde estão posicionadas as bobinas de recepção, que no caso de Yusa [28] e Koyama [29] estão conectadas de forma diferencial, as quais captam as variações no fluxo das correntes induzidas devido à presença de discontinuidades. A conexão diferencial, como o próprio nome sugere, indica que o sinal de resposta da sonda corresponde à diferença entre a resposta das bobinas, isto é, estando duas bobinas de mesma indutância sob a mesma região, a resposta de diferença entre as bobinas é nula. Analisando os gráficos 3.5b e c, tendo em vista que na região central da trinca as bobinas de recepção estão sob o mesmo efeito da trinca (sinal nulo), obtém-se pela varredura somente a indicação das bordas da trinca. Comparando os resultados 3.5b e c, em 3.5b foi utilizado uma maior frequência para excitação da sonda, 100 kHz, o que explica a presença de picos de maior amplitude no resultado, devido a maior densidade de corrente induzida, e picos mais estreitos, dado ao menor alcance das correntes induzidas.

A última sonda utilizada foi a ortogonal, nomeada de *plus-point* pelo autor, a qual também apresenta duas bobinas conectadas de forma diferencial, no entanto, com um arranjo particular. As bobinas estão dispostas de forma ortogonal, bem próximas, com suas camadas de enrolamento sobrepostas, o que faz com que sua resposta de inspeção em um defeito numa superfície plana seja próxima da resposta de uma bobina absoluta. No entanto, devido ao arranjo ortogonal e a conexão diferencial, tal configuração oferece diversas vantagens em termos de sensibilidade de inspeção (vide amplitude do gráfico 3.5d) e ruídos de efeitos de *lift-off*.

Conforme apontado pelos resultados da figura 3.5 a presença da trinca de fadiga é claramente indicada com as três configurações de sensores, ressaltando a eficiência da técnica de correntes parasitas para inspecionar trincas de fadiga em ligas de níquel. Apesar de serem resultados com trincas aparentes em superfície plana de material paramagnético, o que facilita a aplicação do ensaio, o trabalho foi pioneiro na obtenção de resultados de inspeção em trincas reais de fadiga e na disponibilidade dos dados de inspeção para validação de modelos computacionais.

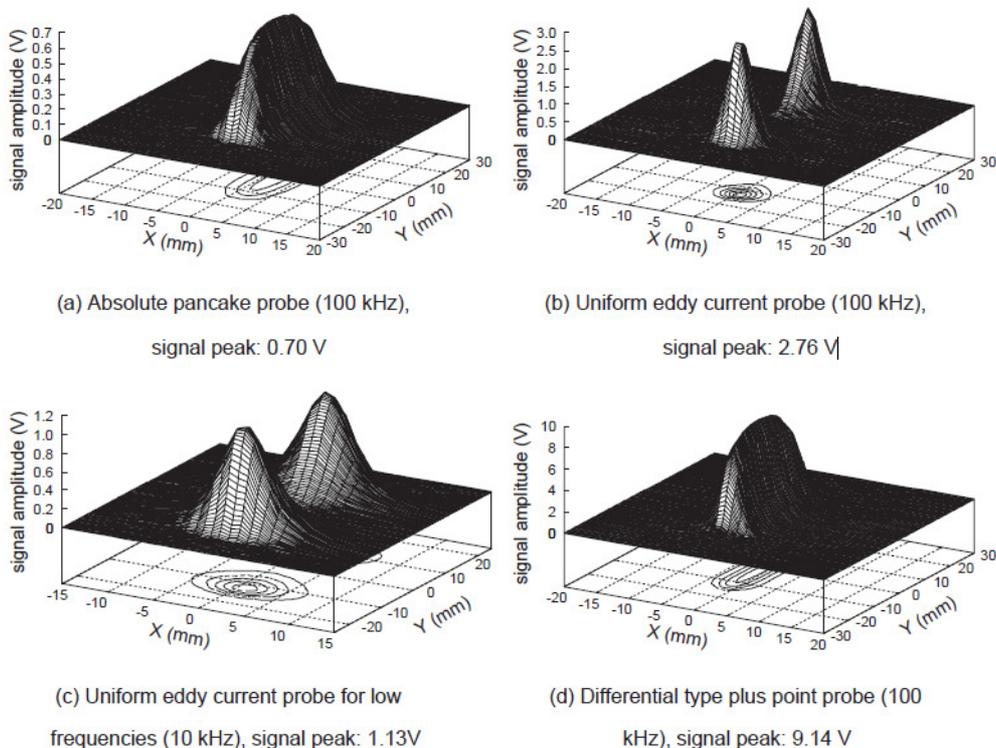


Figura 3.5: Varreduras da trinca de fadiga com diferentes sondas e frequências [28].

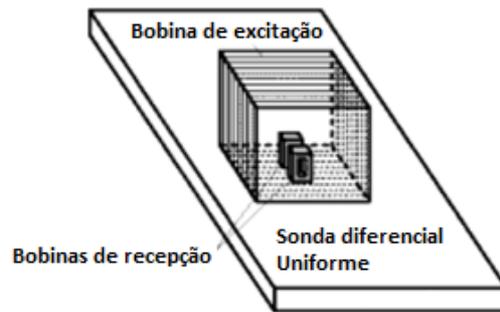


Figura 3.6: Configuração da sonda diferencial uniforme utilizada por Yusa *et.al.* [28].  
Adaptado de [29].

Huang *et.al.* [30] investigaram, além da detecção, o dimensionamento de trincas de fadiga em chapas de aço inoxidável austenítico 316. Três trincas foram obtidas a partir da variação do número total de ciclos de carregamentos na chapa apoiada em 4 pontos. Para a trinca de fadiga 1 (FC1) foram realizados 80.000 mil ciclos, para a trinca de fadiga 2 (FC2) 70.000 ciclos e para a trinca 3 (FC3) 100.000 ciclos. Sondas de correntes parasitas com configuração ortogonal, com as bobinas conectadas de forma diferencial, foram testadas. A figura 3.7 apresenta um esquemático com o dimensional da sonda nas vistas superior e frontal. As varreduras foram realizadas com um *lift-off* de 1,0 mm e frequência de 50 kHz. No mapa de varredura das trincas de fadiga, figura 3.8, é possível identificar a presença das trincas FC1 e FC3 com uma boa relação sinal-ruído, enquanto que para trinca FC2, a amplitude do sinal referente a trinca se apresentou de forma mais atenuada. Provavelmente este fato seja atribuído a menor profundidade da trinca tendo visto que foi conseguida a partir de uma menor quantidade de ciclos de fadiga.

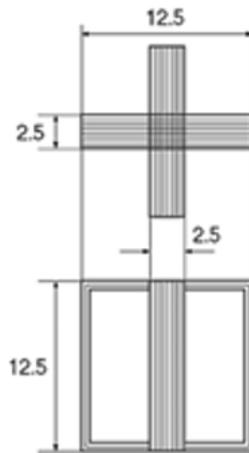


Figura 3.7: Sonda com configuração ortogonal, nomeada de *plus point* (+ point) pelo autor [30]. Cotas no desenho em milímetros.

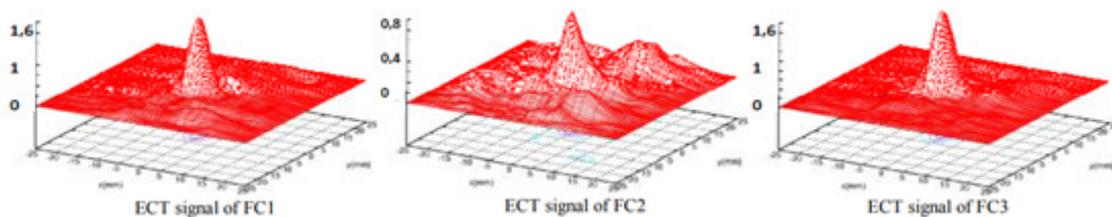


Figura 3.8: Varreduras das trincas de fadiga com diferentes profundidades. Da esquerda para direita: trinca rasa, intermediária e profunda. Adaptado de [30].

Para o dimensionamento das trincas foi fabricado um corpo de prova de calibração com entalhe de eletroerosão de 5 mm de profundidade. Após calibração as trincas de fadiga foram dimensionadas a partir do sinal de inspeção e em seguida correlacionados com a profundidade verdadeira das trincas, conseguidas a partir de ensaio metalográfico. A figura 3.9 apresenta a seção transversal das trincas, onde é possível visualizar as diferentes profundidades alcançadas, sendo a profundidade da trinca FC1 de 1,1 mm, da FC2 de 0,8 mm e da FC3 igual a 1,2 mm. A profundidade das trincas corroboram os resultados apresentados na figura 3.8, onde os sinais das trincas FC1 e FC2 apresentam amplitudes próximas e maiores que os da FC2.

Os valores alcançados pelo dimensionamento através dos sinais de correntes parasitas apresentaram uma boa correlação com os valores reais de profundidade das trincas, apresentando um desvio médio entre o valor real e medido de aproximadamente 7%.

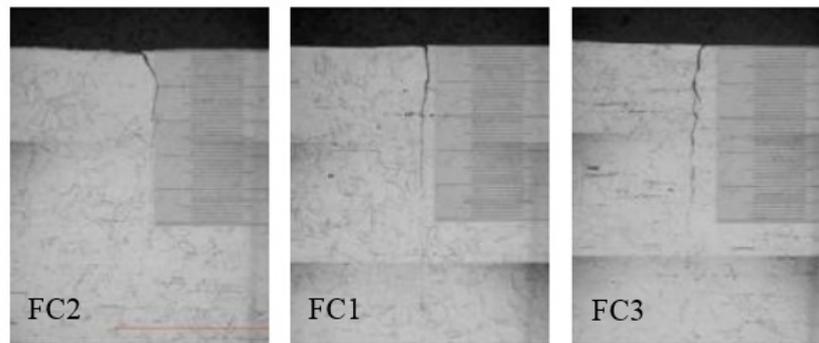


Figura 3.9: Seção transversal dos corpos de prova em aço AISI 316 mostrando as trincas de fadiga obtidas por [30]. Da esquerda para direita, FC2 com 0,8 mm de profundidade, FC1 com 1,1 mm e FC3 com 1,2 mm.

Nakagawa *et.al.* [31] estudaram além da confiabilidade de detecção da técnica de correntes parasitas, os efeitos da utilização dos entalhes de eletroerosão para representar trincas de fadiga. O estudo de comparação entre sinais de inspeção de trincas de fadiga com sinais de entalhes de eletroerosão é relevante para o presente trabalho, pois se tratando da detecção de defeitos na interface entre a junta soldada e o metal de base de dutos cladeados, trabalhar com entalhes de eletroerosão simplifica consideravelmente a preparação dos corpos de prova. Portanto, é importante analisar as diferenças e possíveis correções a serem feitas na inspeção, para que os sinais dos entalhes de eletroerosão sejam representativos para situação de campo, onde se deseja a detecção de trincas de fadiga.

Em [31], diferentes entalhes de eletroerosão foram inseridos em amostras de liga de Titânio (Ti-6246) e Níquel (IN-100), onde, variou-se a abertura e o formato dos entalhes e manteve-se constante o comprimento e a profundidade. A figura 3.10

apresenta uma fotografia de topo dos entalhes onde é possível notar as diferentes aberturas, e, ao lado da imagem, os formatos dos entalhes, retangular e semicircular.

Para detecção dos entalhes foi utilizado uma sonda de correntes parasitas diferencial, com o esquemático apresentado pela figura 3.11, operando em 2 MHz. Esta é a configuração clássica de sondas que operam de forma diferencial, sendo amplamente utilizada no setor aeronáutico principalmente para inspeção de peças planas. Devido a sua baixa indutância, 32 espiras por bobina, é preciso operar com alta frequência para que se alcance uma densidade de corrente suficiente para realizar a inspeção.

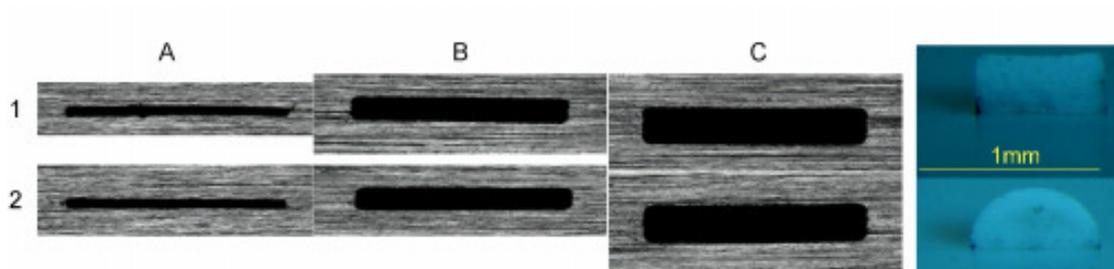


Figura 3.10: Vista superior dos entalhes fabricados com as réplicas (à direita) dos formatos dos entalhes, retangular e semicircular [31].

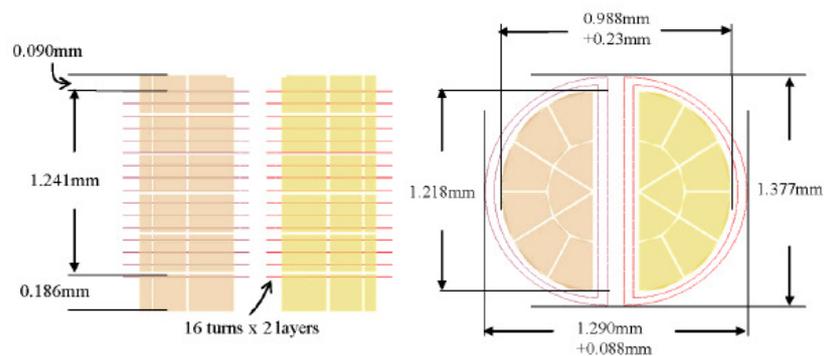


Figura 3.11: Vista frontal e superior da sonda diferencial utilizada por [31].

A figura 3.12 relaciona a amplitude da voltagem pico a pico ( $V_{pp}$ ) do sinal de inspeção com a abertura dos entalhes fabricados. Isto é, para cada entalhe usinado foi relacionada sua abertura com o respectivo sinal de inspeção, onde a curva pontilhada indica a variação da amplitude para os entalhes de formato semicircular e a curva cheia para os entalhes com formato retangular. Conforme esperado, o entalhe de maior dimensão, isto é, o que possui maior abertura e formato retangular, resulta no sinal de maior amplitude, devido à alta impedância imposta pelo defeito no percurso das correntes induzidas. A atenuação do sinal do maior entalhe em relação ao sinal do entalhe de menor dimensão, menor abertura e formato semicircular, foi da ordem de 28% do valor da amplitude. A partir dos resultados alcançados com os entalhes fabricados, foi ajustado uma função linear nos dados, extrapolando-os para valores de aberturas que os autores nomearam de abertura “zero”. Esta abertura “zero” teria uma amplitude de resposta próxima ao de um sinal proveniente de trincas planares de fadiga. Ao extrapolar os dados para abertura “zero” verifica-se uma queda da amplitude do sinal do entalhe de eletroerosão ainda mais intensa, chegando a uma atenuação da amplitude do sinal na ordem de 35%.

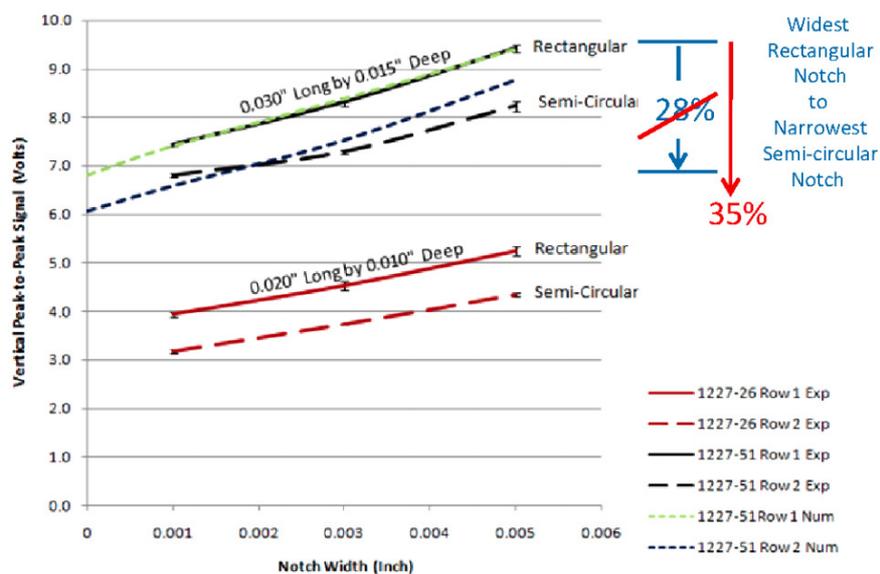


Figura 3.12: Extrapolação dos resultados de amplitude dos entalhes de eletroerosão para representação da trinca de fadiga (abertura “zero”) com a atenuação da amplitude do sinal chegando a 35% [31].

Larson *et.al.* [32] apresentaram um trabalho similar a [31], comparando entalhes de eletroerosão com trincas de fadiga em liga de titânio e alumínio. Para os testes, foi utilizada uma sonda absoluta e uma diferencial, operando em frequências entre 500 kHz–2 MHz. Os entalhes estudados no trabalho eram superficiais e rasos, com profundidade variando entre 25,4  $\mu\text{m}$  e 0,4 mm, e aberturas variando de 30  $\mu\text{m}$  e 0,12 mm, e foi analisado principalmente a interação entre a abertura com a profundidade dos defeitos. Não foram fabricados defeitos com profundidades acima de 1 mm devido às limitações de fabricação. A figura 3.13 apresenta uma ilustração sobre o procedimento utilizado pelo trabalho, onde, assim como [31], o sinal referente a abertura do entalhe é extrapolado para uma condição de “abertura zero” e em seguida é realizada uma correção no sinal para ajustar o efeito da morfologia das trincas reais.

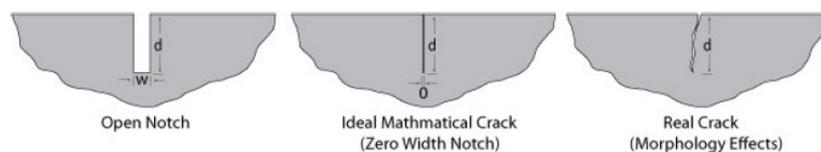


Figura 3.13: Ilustração do procedimento utilizado por [32] para relacionar entalhes de eletroerosão com trincas de fadiga. Da esquerda para direita: entalhe de eletroerosão, extrapolação do sinal do entalhe para uma condição de “abertura zero” e, correção no sinal para ajustar o efeito da morfologia das trincas reais.

Os resultados alcançados pelo autor indicaram que o fator de atenuação da amplitude, para que sinais oriundos de entalhes de eletroerosão sejam representativos para trincas de fadiga, está entre 10 e 30%.

É importante observar que os trabalhos [31 e 32] avaliaram defeitos rasos, com pequenas profundidades, onde o formato do defeito influencia o sinal, deixando dessa forma, uma lacuna a ser estudada sobre a representação de trincas com grandes profundidades. Devido à baixa capacidade de penetração das correntes parasitas, muitas vezes o ensaio se limita a detecção de trincas superficiais, e a informação que a trinca encontrada possui uma profundidade maior que a alcançada pelas correntes induzidas já é suficiente.

### **3.2.2 Aplicação da técnica de correntes parasitas para detecção de trincas em junta soldada**

As juntas soldadas são em regra regiões críticas para inspeção. Em diversas situações são essas regiões as mais vulneráveis para o surgimento de defeitos. Desde o processo de fabricação, onde as juntas são submetidas a intensos gradientes de temperatura, até a operação dos equipamentos, na qual são naturalmente concentradores de tensão, é possível que ocorra o surgimento de trincas a partir dos mais variados mecanismos. Apesar da alta relevância para inspeção, as juntas soldadas são regiões complexas para avaliação. O metal de adição com características morfológicas e eletromagnéticas de material fundido, com propriedades em geral diferente das do material de base, aliado à variação geométrica do cordão de solda, dificultam o processo de inspeção. Considerando a técnica de correntes parasitas, foram selecionados três trabalhos que apresentaram resultados relevantes sobre a inspeção de juntas.

Watkins *et.al.* [33] inspecionou corpos de prova com juntas soldadas que representam as soldas de um reservatório de resíduo radioativo para indústria nuclear, cujo objetivo é detectar trincas superficiais nas juntas. A sonda utilizada possui configuração ortogonal conforme apresentado pela figura 3.14a e b, e, operou com uma frequência de 240 kHz. As bobinas da sonda estão dispostas de forma perpendicular, com seus eixos paralelos à superfície de inspeção. Com essa configuração, as bobinas, que estão conectadas de forma diferencial e possuem as camadas de enrolamento sobrepostas, comparam uma região muito próxima, porém, com o curso das correntes induzidas perpendiculares entre si. A figura 3.15 apresenta a comparação do comportamento das correntes induzidas geradas por uma única bobina com as correntes induzidas produzidas por duas bobinas perpendiculares. Estando as bobinas conectadas de modo diferencial, pequenas variações nas propriedades do material que seja comum às duas bobinas serão subtraídas e não apresentarão sinal de resposta. O mesmo acontece com sinais de *lift-off*, como ambas as bobinas percebem o afastamento, o sinal é suprimido. Qualquer variação significativa nas condições do material que não seja comum às duas bobinas apresentará um sinal diferencial de resposta.

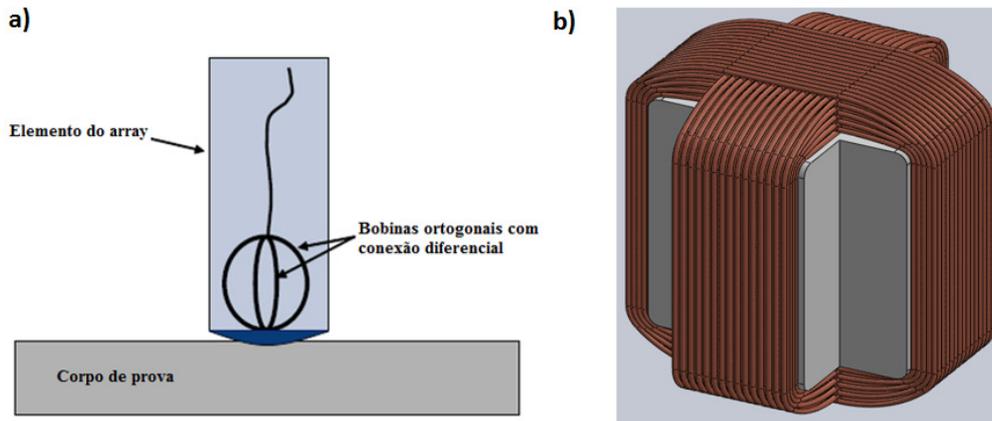


Figura 3.14: a) sensor com bobinas com configuração ortogonal (adaptado de [33]); e b) ilustração da sonda ortogonal onde é possível visualizar as camadas das bobinas entrelaçadas.

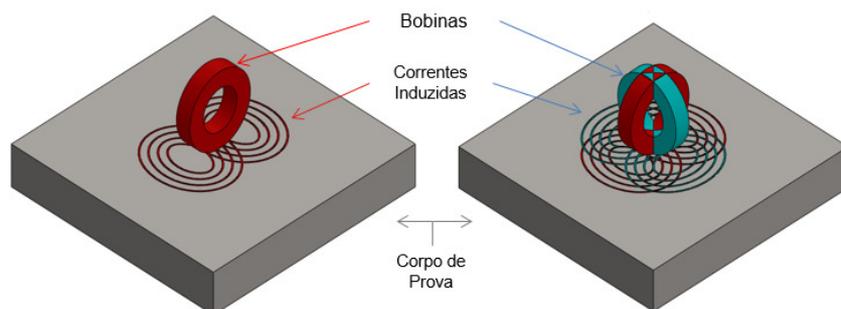


Figura 3.15: Correntes induzidas produzidas por uma bobina (à direita) e produzidas por duas bobinas perpendiculares (à esquerda).

No corpo de prova fabricado em aço inoxidável austenítico 316L foram inseridos defeitos circunferenciais e entalhes de eletroerosão dispostos transversalmente e ao longo do cordão de solda. O equipamento comercial da ZETEC MIZ 22 foi utilizado para inspeção e a resolução da varredura de inspeção foi de 0,5 mm. A figura 3.16 apresenta o resultado de varredura do corpo de prova onde é possível identificar a presença dos defeitos artificiais inseridos no cordão de solda e adjacências.

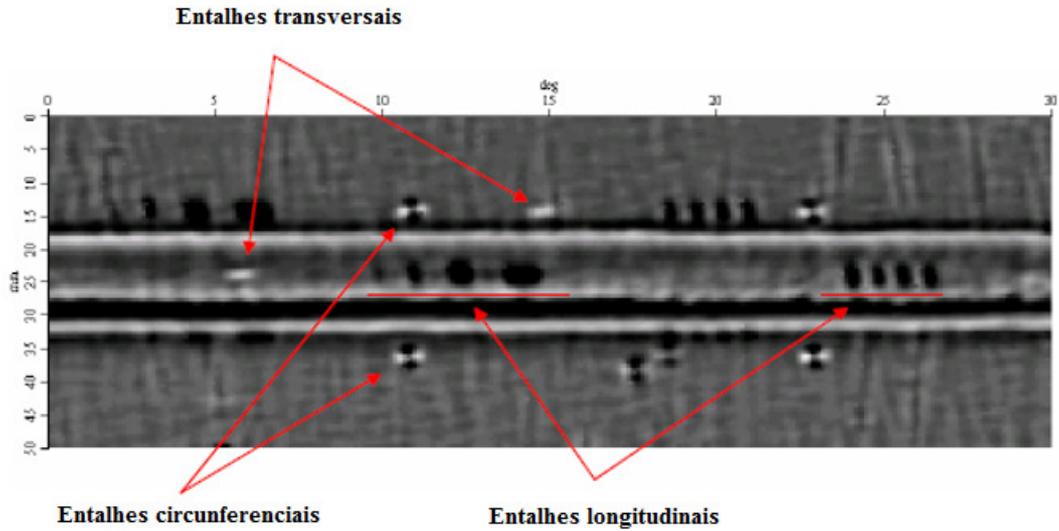


Figura 3.16: Resultado da varredura do corpo de prova em aço inoxidável 316L com a sonda de correntes parasitas com configuração ortogonal. Adaptado de [33].

Lamtenzam *et.al.* [34] investigaram a inspeção de juntas soldadas em aço estrutural ASTM A588 aplicado em pontes rodoviárias. Para inspeção foi utilizado também uma sonda de correntes parasitas com configuração ortogonal operando em 240 kHz. O trabalho se difere dos demais encontrados devido ao material inspecionado apresentar características ferromagnéticas, o que prejudica sobretudo a capacidade de penetração das correntes induzidas. A figura 3.17 ilustra a situação de inspeção em campo, na qual o objetivo final é a detecção de trincas em juntas soldadas de vigas metálicas.

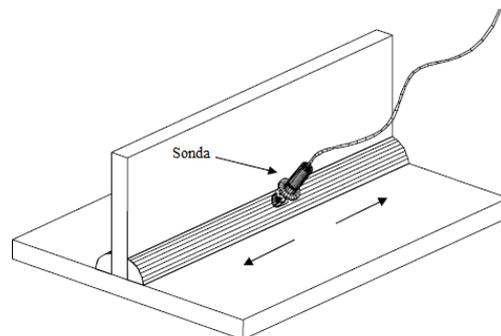


Figura 3.17: Ilustração da aplicação em campo do ensaio. Adaptado de [34].

Corpos de prova foram fabricados, sendo um de calibração com entalhes de eletroerosão superficiais contendo diferentes profundidades (figura 3.18), e os demais com junta soldada e trincas representativas para as encontradas em campo (não foi detalhado a profundidade das trincas nem o processo fabricação). Devido à elevada permeabilidade do material, as correntes induzidas se concentram na superfície atingindo uma profundidade de penetração padrão de 0,12 mm (para 240 kHz). Vale mencionar que este valor da profundidade de penetração padrão não é um indicador da máxima profundidade que se consegue detectar defeitos, é simplesmente um valor padrão medido nos ensaios que indica a profundidade na qual a densidade de corrente induzida, que possui um decaimento exponencial ao longo da espessura do material inspecionado, atinge  $\sim 37\%$  ( $1/e$ ) do valor da densidade de corrente na superfície [23], conforme detalhado no item 3.1.2 do presente capítulo. Entretanto, trabalhar fora do intervalo de penetração padrão afeta diretamente a resolução da sonda.

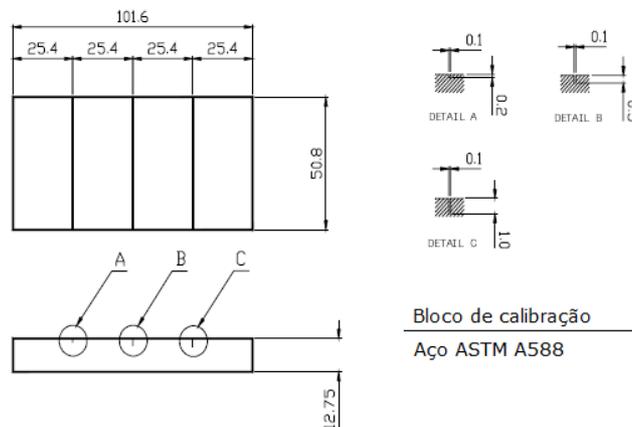


Figura 3.18: Bloco de calibração com entalhes de eletroerosão com diferentes profundidades. Adaptado de [34].

As figuras 3.19 - 3.21 apresentam os resultados de inspeção dos corpos de prova fabricados, com as componentes, real e imaginária, da variação da impedância elétrica em função das amostras adquiridas durante a inspeção. A figura 3.19 apresenta os resultados do bloco de calibração, onde é possível perceber a identificação dos entalhes e suas respectivas profundidades de acordo com a amplitude de resposta do sinal. Vale

perceber que os entalhes apresentam profundidades maiores que a de penetração padrão e, mesmo nessa condição, o sensor foi capaz de discriminá-los. A figura 3.20 apresenta o resultado de inspeção de um corpo de prova com junta soldada e uma trinca transversal com 11 mm de comprimento. O resultado alcançado é próximo ao obtido com o corpo de prova de calibração, sendo fácil identificar a presença da trinca. Já a figura 3.21 apresenta um resultado com um comportamento diferente. Apesar da trinca também ter sido identificada, aparecem oscilações no sinal, que, segundo o autor, ocorrem exclusivamente devido ao acabamento superficial da solda. No entanto, suspeita-se que além da influência do acabamento, é possível que a trinca com 64 mm de comprimento, apresente variações de profundidade, contribuindo para que ocorram tais variações.

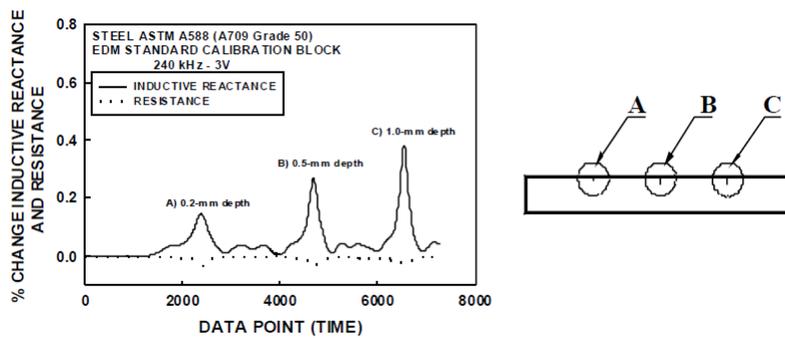


Figura 3.19: Resultado de inspeção do bloco de calibração com entalhes de eletroerosão com diferentes profundidades [34].

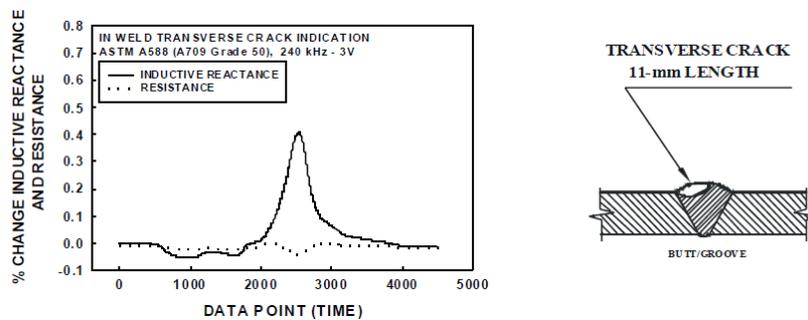


Figura 3.20: Resultado de inspeção da junta soldada com trinca transversal à solda [34].

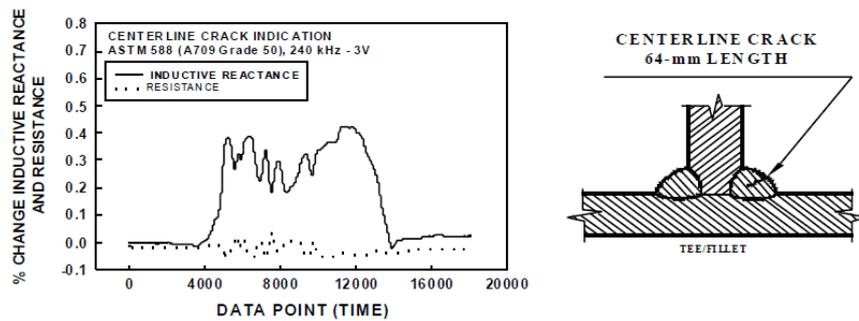


Figura 3.21: Resultado de inspeção em corpo de prova com trinca de 64 mm de comprimento ao longo da solda [34].

Conforme apresentado pelos trabalhos selecionados, sensores com configuração ortogonal têm sido amplamente aplicados para detecção de trincas em juntas soldadas. Tendo em vista os bons resultados obtidos e a relevância da configuração ortogonal, Hansen [35] apresentou um estudo sobre as principais vantagens e limitações de tal configuração.

As sondas ortogonais possuem bobinas, que, como o próprio nome sugere, estão ortogonalmente dispostas, e, com suas camadas de enrolamento sobrepostas conforme ilustração da figura 3.22. Durante o processo de fabricação da sonda, a precisão do posicionamento das camadas das bobinas é crítica para obtenção do sinal requerido para o procedimento de inspeção. Bobinas que não estejam exatamente à  $90^\circ$  ou com suas camadas entrelaçadas não apresentam o melhor desempenho de inspeção. Dentre as características positivas e negativas da sonda ortogonal descritas pelo autor, destacam-se:

- Alta capacidade de inspeção sem a retirada de camadas de tinta;
- Durante a inspeção é fundamental que as bobinas não estejam à  $45^\circ$  do defeito, pois no eixo  $\pm 45^\circ$  o sinal de resposta do sensor é nulo devido à conexão diferencial. Portanto, é importante saber de antemão a natureza do

defeito que se deseja inspecionar ou seguir variados movimentos de inspeção conforme indicado pela figura 3.23;

- Mínimo efeito de *lift-off*, 8 dB/mm, enquanto bobinas com configuração absoluta apresentam 40 dB/mm, diminuindo assim a quantidade de sinais espúrios;
- Alta sensibilidade para defeitos lineares como trincas e baixa sensibilidade para defeitos simétricos como furos ou pites;
- Diferentes tamanhos, indutâncias e faixa de frequência de operação, de acordo com a aplicação.

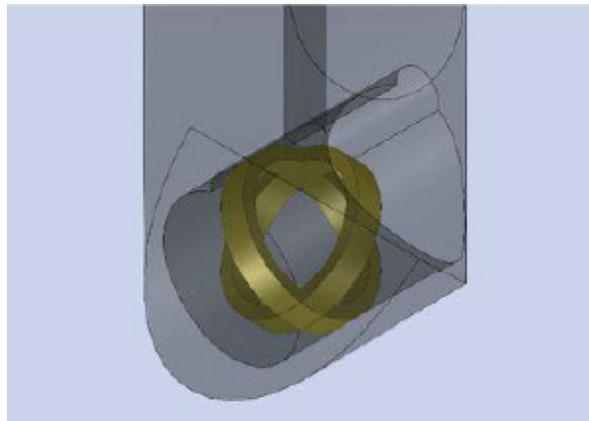


Figura 3.22: Ilustração da sonda com configuração ortogonal [35].

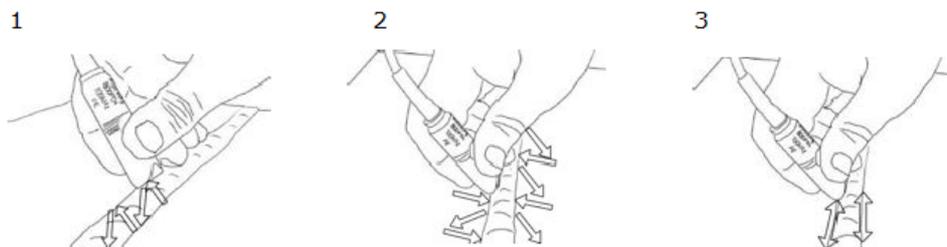


Figura 3.23: Sequência de movimentos de inspeção para garantir que possíveis defeitos não estejam à  $\pm 45^\circ$  do eixo das bobinas durante inspeção. Adaptado de [35].

Os resultados apresentados por [33, 34 e 35] motivam a aplicação de sondas de correntes parasitas com configuração ortogonal para detecção de trincas de fadiga em juntas soldadas de material cladeado.

### **3.2.3 Aplicação da técnica de correntes parasitas para inspeção de material cladeado**

Poucos trabalhos foram publicados utilizando a técnica de correntes parasitas para inspeção de material cladeado. Yusa e Janousek [36] avaliaram a detecção de trincas de fadiga superficiais e subsuperficiais em camadas de *weld overlay* de material cladeado. Além da detecção de trincas de fadiga o trabalho analisou a espessura de material remanescente entre a trinca subsuperficial e a superfície de inspeção, a partir de modelos numéricos de problema inverso, e comparou o resultado da técnica de correntes parasitas com os métodos de queda de potencial e ultrassom. A figura 3.24 apresenta um esquemático do corpo de prova fabricado com o detalhe do entalhe de eletroerosão para facilitar a nucleação das trincas de fadiga. As trincas foram introduzidas através de um carregamento senoidal oscilando em 10 Hz. Cinco trincas de fadiga foram obtidas e nomeadas como fc1, fc2, fc3, fc4 e fc5, sendo que as trincas fc1 e fc2 atingiram a superfície e as demais ficaram como subsuperficiais. A figura 3.25 apresenta uma fotografia das trincas de fadiga fc3, fc4 e fc5, onde apresentam respectivamente uma distancia entre a ponta da trinca e a superfície de: 1,51 mm, 3,25 mm e 2,10 mm. Além dos corpos de prova com as trincas foi fabricado um corpo de prova de calibração com entalhe de eletroerosão retangular nas seguintes dimensões: 5 mm de profundidade, 10 mm de comprimento e 0,3 mm de abertura.

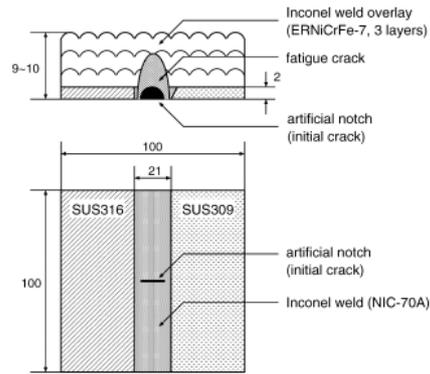


Figura 3.24: Esquemático do corpo de prova utilizado [36].

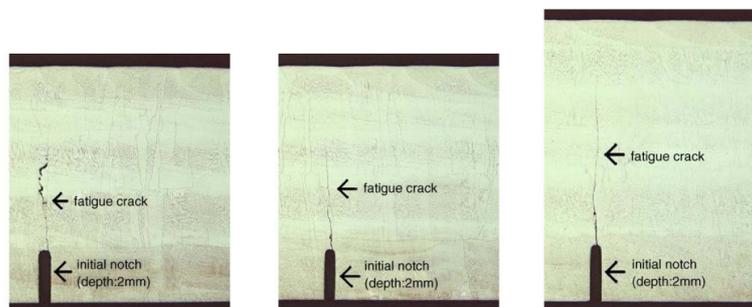


Figura 3.25: Detalhe das trincas de fadiga, fc3, fc4 e fc5. Adaptado de [36].

O sensor de correntes parasitas utilizado para inspeção é apresentado pela figura 3.26 nas vistas frontal, lateral e superior, o qual consiste de uma bobina de excitação tangencial, que induz um fluxo de corrente uniforme na parte de baixo da bobina onde está posicionada uma bobina de recepção ou do inglês *pick-up coil*. A figura 3.27 apresenta o resultado de inspeção das trincas de fadiga e do entalhe de eletroerosão. Os gráficos apresentam de forma direta, sem tratamento, a amplitude do sinal de voltagem da bobina receptora para uma frequência de excitação de 10 kHz. Nos resultados é possível perceber que as trincas fc1, fc2 e o entalhe de eletroerosão (EDM) apresentam as maiores amplitudes, pois estes defeitos estão aparentes na superfície. As varreduras das trincas subsuperficiais apresentam uma amplitude de resposta mais atenuada, sendo a trinca fc4 a de menor amplitude, uma vez que está mais afastada da superfície.

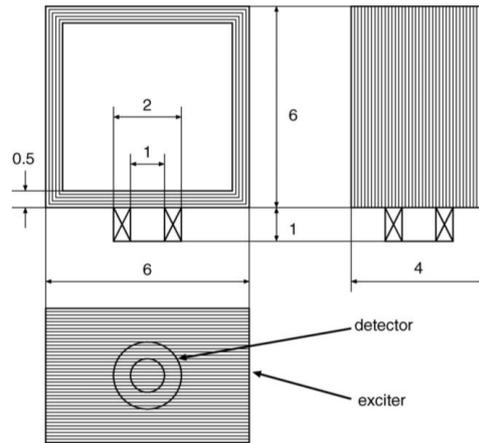


Figura 3.26: Sonda uniforme utilizada para detecção de trinca de fadiga em solda de Inconel em material cladeado [36].

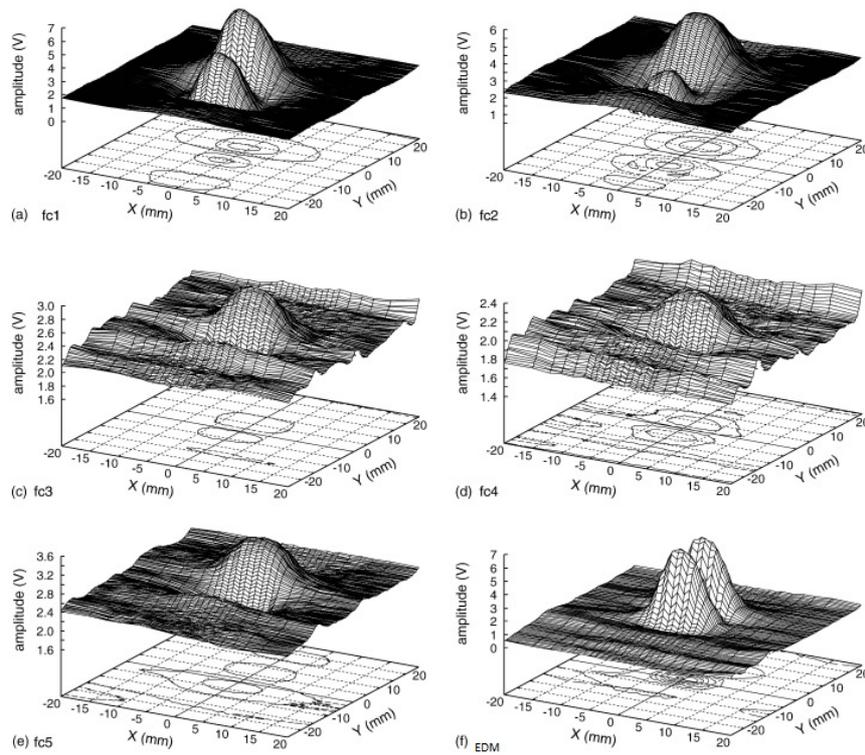


Figura 3.27: Resultado de inspeção das cinco trincas de fadiga e do entalhe de eletroerosão com a sonda uniforme [36].

Yusa e Janousek [36] utilizaram um algoritmo computacional desenvolvido por Chen [37] e Miya [38] para reconstrução do perfil das trincas a partir do sinal de correntes parasitas. O resultado da reconstrução das trincas foi comparado com os valores das trincas medidos por ultrassom e queda de potencial. A figura 3.28 apresenta a tabela publicada por [36] comparando os valores de espessura de material remanescente, isto é, a distância da ponta da trinca para superfície, alcançados pelas técnicas com o valor real. O resultado alcançado pela técnica de correntes parasitas foi o que mais se aproximou dos valores verdadeiros, mostrando a capacidade da técnica para dimensionar trincas de fadiga mesmo subsuperficiais.

	Potential drop	Ultrasonic	Eddy current	True
fc3	4.0	4.0	1.47	1.51
fc4	1.5	6.0	2.17	3.25
fc5	2.0	1.8	2.24	2.10

Figura 3.28: Comparação dos valores reais do comprimento das trincas de fadiga com os obtidos a partir dos ensaios: queda de potencial, ultrassom e correntes parasitas [36].

### **3.2.4 Considerações finais sobre a aplicação da técnica de correntes parasitas para detecção de trincas em material cladeado**

A utilização de defeitos artificiais é uma prática comum para representar trincas reais na calibração dos ensaios de correntes parasitas [33 e 34]. O baixo custo, a rápida fabricação e o fácil controle dos parâmetros dos defeitos artificiais são algumas vantagens de se fabricar defeitos a partir da usinagem do tipo eletroerosão. Apesar da utilização de defeitos usinados ser uma prática usual e bem aceita como referência de calibração em diversas aplicações, os trabalhos apresentados por [31 e 32] mostraram que sinais de defeitos artificiais precisam ser corrigidos para se tenha uma representação legítima dos defeitos encontrados em campo. No entanto, somente entalhes com pequenas profundidades foram analisados, deixando uma lacuna para investigação de defeitos onde as correntes induzidas não interagem com a profundidade do defeito.

As sondas com configuração ortogonal têm sido amplamente aplicadas para inspeção de juntas soldadas. Apesar da limitação da sonda ao inspecionar defeitos posicionados a  $\pm 45^\circ$  do eixo das bobinas, o presente trabalho tem como objetivo a inspeção de trincas adjacentes à raiz da solda, onde o ângulo de ataque da sonda é perpendicular ao comprimento da trinca. Isto posto, a sonda com configuração ortogonal, por apresentar baixa sensibilidade a variações de *lift-off* e os principais resultados de inspeção em defeitos lineares, se destaca para inspecionar trincas de fadiga na raiz de juntas soldadas de dutos cladeados.

Poucos trabalhos foram encontrados sobre inspeção de material cladeado com a técnica de correntes parasitas. Embora a configuração proposta por [36] tenha alcançado bons resultados, a sonda precisa necessariamente estar paralela à superfície para que seja alcançado os resultados publicados. Pequenas variações no posicionamento causam ruídos que dificultam a capacidade de detecção da sonda.

Não foram encontrados trabalhos que utilizam a técnica de correntes parasitas em ferramentas autônomas para detecção de trincas em juntas soldadas de qualquer material.

## **4. Considerações práticas e materiais e métodos**

### **4.1 Considerações práticas para aplicação da técnica de correntes parasitas em ferramentas de inspeção interna para detecção de trincas de fadiga em juntas de dutos cladeados**

A detecção de trincas de fadiga na raiz da solda de dutos cladeados possui restrições que inviabilizam a utilização das ferramentas de inspeção disponíveis no mercado. A posição de nucleação da trinca de fadiga, as variações geométricas causadas pela penetração da raiz da solda, a velocidade de inspeção das ferramentas e a eletrônica embarcada para processamento dos dados, são alguns exemplos de tais restrições e, serão detalhadas no presente capítulo.

#### **4.1.1 Posição de nucleação da trinca e variações geométricas do cordão de solda**

No ponto preferencial para nucleação da trinca, interface com o cordão de solda, além da variação metalúrgica encontrada na transição metal de base/metal de solda, a qual pode causar sinais espúrios durante a inspeção, existe ainda a variação geométrica devido a penetração da raiz da solda, que, por sua vez, pode promover o afastamento do sensor causando sinais de *lift-off* que dificultam a identificação das trincas.

A figura 4.1 apresenta um desenho esquemático que ilustra algumas das dificuldades que devem ser transpassadas para que seja possível desenvolver uma ferramenta de inspeção interna para detecção de trincas de fadiga em dutos cladeados. Onde, a figura 4.1a apresenta uma seção de um duto cladeado com junta soldada transversal; a 4.1b destaca uma fatia do duto para facilitar a ilustração das restrições que inviabilizam a utilização das ferramentas de inspeção disponíveis no mercado; a 4.1c esclarece a posição de nucleação da trinca de fadiga adjacente à raiz, e; a 4.1d apresenta uma seção transversal da solda com a representação da trinca de fadiga e um perfil da variação geométrica, linha pontilhada, que indica o percurso do sensor durante inspeção.

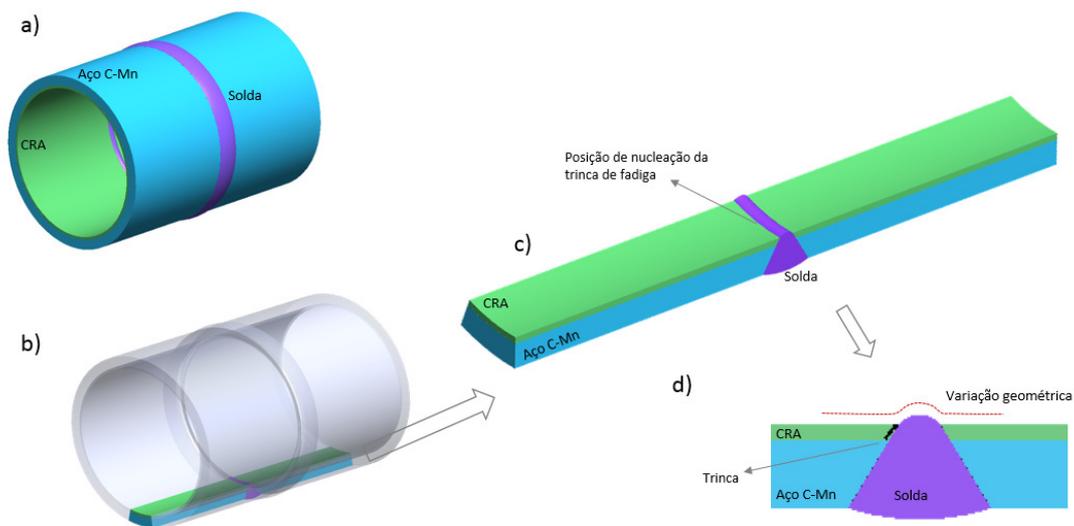


Figura 4.1: Ilustração das restrições que inviabilizam a utilização das ferramentas de inspeção disponíveis no mercado; a) seção de um duto cladeado com junta soldada transversal; b) destaque da fatia do duto para apresentação das restrições; c) posição de nucleação da trinca de fadiga; d) seção transversal da solda com a posição da trinca de fadiga e perfil da variação geométrica, linha pontilhada, que indica o percurso a ser desempenhado pelo sensor durante inspeção.

Os trabalhos destacados na revisão bibliográfica apresentaram o potencial da técnica de correntes parasitas para a detecção de trincas em juntas soldadas. A alta capacidade de detecção aliada ao mínimo efeito de *lift-off* oferecido pelas sondas com configuração ortogonal, motivam a aplicação da técnica em ferramentas de inspeção interna para detecção de trincas em juntas de dutos cladeados. No entanto, aspectos importantes para a aplicação da técnica em ferramentas de inspeção interna não foram discutidos ou apresentados pelos autores.

Nos trabalhos selecionados foram desempenhados diferentes processos de inspeção, como por exemplo: inspeção automatizada em laboratório [28, 30 e 36], inspeção manual em campo [34 e 35] e inspeção de campo automatizada [33]. Observou-se que em todos estes processos são realizadas múltiplas passadas do sensor

pelos defeitos, o que é recomendável, pois facilita a interpretação do operador e, conseqüentemente, a detecção dos defeitos.

Em ferramentas de inspeção interna normalmente o fluido bombeado é utilizado para propulsão da ferramenta. Dessa forma, existe somente um sentido de inspeção, sentido do fluxo de bombeamento e a ferramenta passa uma única vez por cada região do duto, o que difere dos processos utilizados na revisão bibliográfica. Estas características induzem ao estudo de duas questões que não foram citadas pelos trabalhos analisados: avaliação da capacidade de detecção da técnica quando o sensor passa uma única vez sobre o defeito e a detecção de defeitos independente da sua posição no cordão de solda.

A detecção de defeitos independente da sua posição no cordão de solda é de alta pertinência, pois como a ferramenta percorre um único sentido, a posição do defeito pode interferir diretamente sua capacidade de detecção. A figura 4.2 ilustra o cenário do posicionamento do defeito antes e depois do cordão de solda, onde a seta indica o sentido de inspeção. Estando o defeito antes do cordão de solda, o sensor incide primeiro pelo defeito e em seguida sofre os efeitos da geometria da raiz da solda, o que, a priori, facilita a detecção, dado que se tem a garantia que o sensor passou pelo defeito. No caso do defeito estar após a raiz de solda, o sensor sofre os efeitos da geometria do cordão, e, dependendo da velocidade de inspeção e da altura da penetração da raiz da solda, existe o risco do sensor não incidir diretamente sobre o defeito.

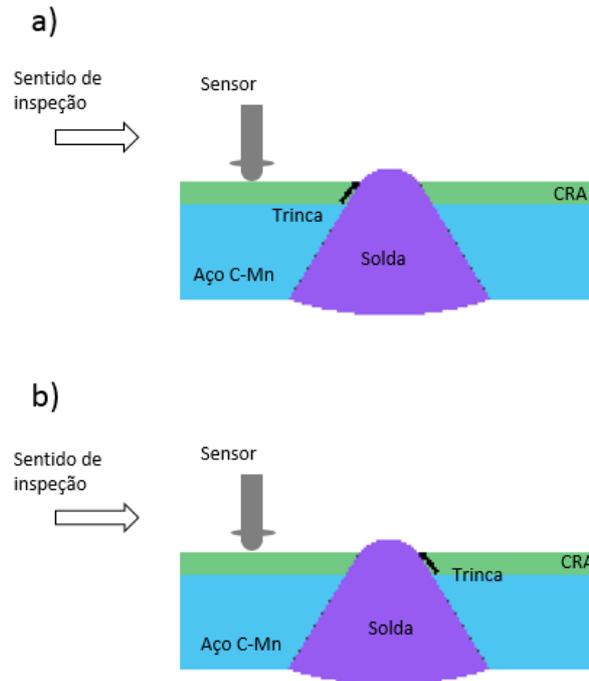


Figura 4.2: Posição da trinca na raiz da solda, onde a) trinca antes do cordão de solda; b) trinca após o cordão de solda.

A figura 4.3a e b apresenta a situação do sensor passando pelo defeito antes e depois do cordão de solda com baixa e alta velocidade, respectivamente. A linha pontilhada ilustra o percurso do sensor durante inspeção e a seta indica o ponto de contato do sensor após transpassar a raiz da solda. Nesta figura, destaca-se a situação 4.3b (defeito após a raiz da solda com alta velocidade de inspeção), onde é possível perceber que o ponto de contato do sensor após o cordão está afastado da trinca. Quanto maior a velocidade de inspeção e a altura da penetração da raiz da solda, maior é a tendência que o ponto de “aterrissagem” do sensor fique afastado do cordão.

Uma maneira de diminuir a distância entre o ponto de “aterrissagem” e a trinca é a utilização de dispositivos mecânicos com molas no sensor para mantê-lo em contato com a superfície de inspeção. Porém, a definição da constante elástica da mola é crítica. Molas com alta rigidez podem aumentar significativamente o processo de abrasão dos sensores, enquanto o inverso, pode não aproximar suficientemente o ponto de “aterrissagem” com a trinca.

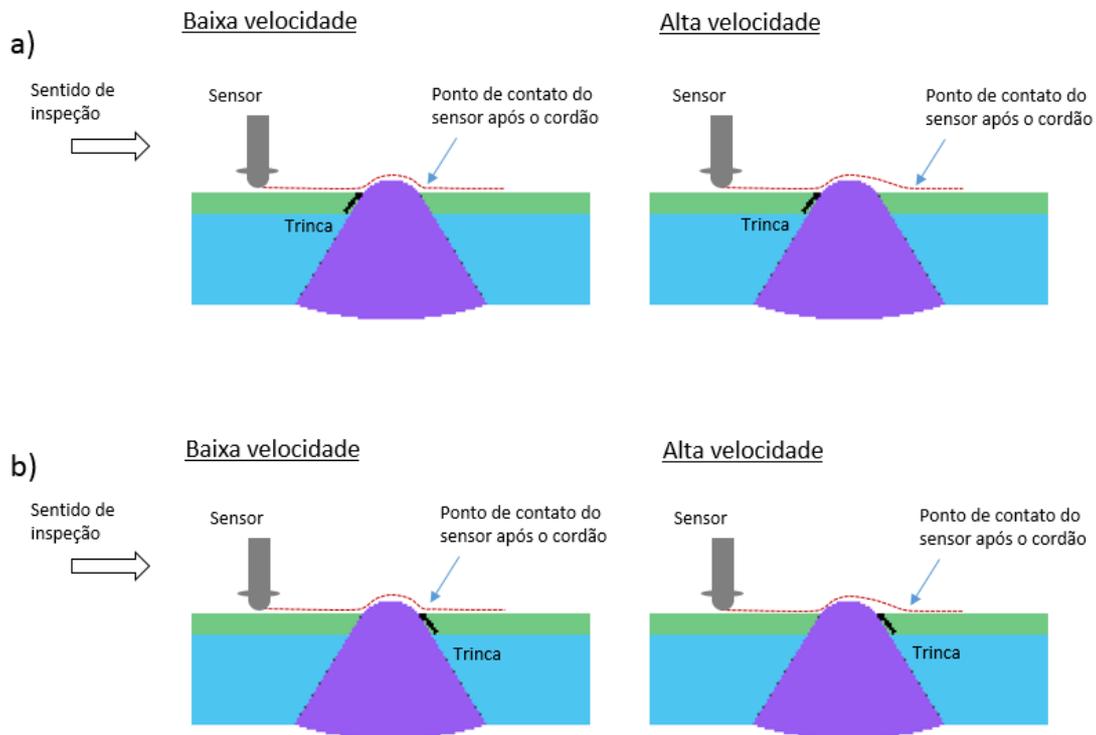


Figura 4.3: Ilustração do sensor passando pelo defeito antes (a) e depois (b) do cordão de solda com baixa e alta velocidade.

#### 4.1.2 Velocidade de inspeção

Outra característica não avaliada pelos autores estudados, e conforme visto, de suma importância em tais ferramentas, é a velocidade de inspeção.

Diferentes velocidades de inspeção influenciam diretamente em diversos aspectos do processo de inspeção. Uma alta velocidade de inspeção traz grandes vantagens ao reduzir o período de intervenção na produção, fazendo com que o duto retorne de maneira célere ao seu curso natural de operação. Entretanto, uma alta velocidade da ferramenta, pode impossibilitar a detecção de determinados defeitos (figura 4.3b) e, além disso, requer uma eletrônica com uma elevada taxa de dados para que se alcance a resolução longitudinal estabelecida em projeto. Conforme visto na

seção 2, a velocidade de operação de uma ferramenta de inspeção interna pode variar entre 0,5 – 4 m/s dependendo da instrumentação utilizada. Supondo que uma determinada ferramenta opere em 1 m/s, para que se alcance uma resolução longitudinal de 3 mm, ou seja, uma medida a cada 3 mm ao longo do percurso de inspeção, é preciso que a frequência de aquisição de dados da ferramenta seja da ordem de 330 Hertz.

Determinadas instrumentações, como por exemplo, *pigs* MFL, utilizam sensores de efeito *hall* [39]. Estes sensores funcionam de forma passiva, apresentando uma variação de voltagem em função do campo magnético presente [40]. Em uma análise elementar, a eletrônica de processamento dos dados para tal instrumentação, consiste na aquisição de dados de voltagem dos sensores e correlacioná-los com os valores de campo magnético, de acordo com a calibração prévia. Portanto, devido a estas características do sensor e aos requisitos da eletrônica embarcada necessária para tal instrumentação, as ferramentas de inspeção que utilizam a técnica de MFL conseguem alcançar velocidades de inspeção de até 4 m/s [11].

Ferramentas com uma instrumentação mais complexa, como no caso de sensores de correntes parasitas, ultrassom, EMAT, que funcionam como sensores ativos, ou seja, o sensor transmite um sinal e capta sua resposta de interação com o material em inspeção, exigem uma eletrônica embarcada mais sofisticada. Tal sofisticação normalmente demanda um tempo maior de processamento, o que diminui a taxa de transmissão de dados e, conseqüentemente a velocidade de inspeção devido à necessidade de manter a mesma resolução longitudinal. Portanto, tais ferramentas costumam operar com velocidades na ordem de 1,0 m/s.

#### **4.1.3 Trinca de fadiga *versus* entalhe de eletroerosão**

Além das dificuldades encontradas com o posicionamento das trincas, geometria da solda, velocidade de inspeção influenciando a capacidade de detecção e resolução longitudinal da ferramenta, existe ainda a dificuldade de validar a técnica de correntes parasitas em ensaios de laboratório devido principalmente à complicação da obtenção de amostras com trincas de fadiga em juntas soldadas. Uma opção para contornar tal problema é a fabricação de amostras com entalhes de eletroerosão em juntas soldadas e

correlacionar os sinais obtidos com sinais de trincas de fadiga, conforme apresentado por [31 e 32]. Embora os resultados alcançados por Nakagawa *et.al.* e Larson *et.al.* [31 e 32] sejam importantes para aplicação em campo, os autores avaliaram exclusivamente defeitos rasos, com pequenas profundidades, onde o formato do defeito influencia diretamente o sinal de inspeção, deixando dessa forma, uma lacuna a ser estudada sobre a representação de trincas com grandes profundidades.

Devido às complicações encontradas para detecção de trincas de fadiga em juntas soldadas de dutos cladeados acima expostas, a primeira abordagem a ser feita no presente estudo será a verificação da capacidade de detecção da técnica de correntes parasitas, sem a preocupação com o dimensionamento dos defeitos. Aprimorar a sensibilidade é imprescindível para inspeção de trincas de fadiga, pois estas possuem dimensões agudas e cometem sinais de baixa amplitude. Uma forma de aprimorar a capacidade de detecção ou sensibilidade da técnica é aumentar a densidade de correntes induzidas no material, o que amplifica o campo secundário, o qual se opõe ao primário gerado pelas bobinas do sensor, resultando em uma maior variação da impedância elétrica do sensor, isto é, maior sensibilidade do ensaio.

As equações 3.2-3.4 apresentadas na seção 3, demonstram como a densidade de corrente induzida se relaciona com a variação do fluxo do campo magnético e a frequência do ensaio, onde é possível perceber que quanto maior a frequência do ensaio, maior é a densidade de correntes induzidas. A equação 3.1, por sua vez, apresenta como a frequência e as propriedades eletromagnéticas do material a ser inspecionado influenciam na profundidade de penetração das correntes induzidas. Nota-se que ao aumentar a frequência para alcançar uma maior densidade de correntes induzidas e, conseqüentemente, uma maior capacidade de detecção, a profundidade de penetração diminui, prejudicando a capacidade de dimensionamento do ensaio. Nesta relação de compromisso, devido às dificuldades listadas para detecção das trincas de fadiga, irá se optar por trabalhar com frequências elevadas para promover a capacidade de detecção do ensaio.

Tendo em vista que a inspeção a ser desempenhada será superficial e os defeitos a serem inspecionados não necessariamente apresentarão profundidade compatível com as alcançadas pelas correntes induzidas, os resultados publicados por [31 e 32], não são aplicáveis para o presente trabalho. Deste modo, para que seja possível a utilização de

entalhes de eletroerosão para representar trincas de fadiga, será necessário investigar as diferenças dos sinais de inspeção em defeitos que a profundidade de penetração das correntes induzidas seja menor que a profundidade dos defeitos. A partir dos resultados alcançados, serão definidas as correções a serem feitas nos sinais de entalhes de eletroerosão de forma a serem representativos para os sinais de trincas de fadiga.

#### **4.1.4 Ponderações finais sobre as considerações práticas para aplicação da técnica de correntes parasitas em ferramenta de inspeção interna para detecção de trincas de fadiga em juntas de dutos cladeados**

Considerando as restrições apresentadas acima, não é possível a aplicação das ferramentas de inspeção interna disponíveis no mercado para detecção de trincas de fadiga em juntas soldadas de dutos cladeados. Deste modo, para que a referida detecção seja viável, é necessário o desenvolvimento de um sistema de inspeção específico para a solução do problema.

Conforme detalhado no capítulo, os principais aspectos práticos a serem considerados no estudo do desenvolvimento do sistema de inspeção são: posição do defeito; variação geométrica do cordão de solda; velocidade de inspeção influenciando a capacidade de detecção e a resolução longitudinal; representação das trincas de fadiga a partir de entalhes de eletroerosão visando facilitar a fabricação dos corpos de prova; frequência do ensaio para aumentar a sensibilidade de inspeção, e; testes com matriz de sensores com configuração relevante para inspeção de campo.

## **4.2 Materiais e métodos**

O presente trabalho teve como proposta para solução do desafio apresentado, a instrumentação de sensores de correntes parasitas com configuração ortogonal em ferramentas de inspeção interna. Para tal, foram realizadas as seguintes atividades:

- Testes de viabilidade da aplicação do sensor de correntes parasitas para detecção de trincas em juntas soldadas de material cladeado;
- Estudo da representação de trincas de fadiga a partir de entalhes de eletroerosão;
- Definição da frequência ótima de operação da sonda para detecção de defeitos;
- Testes de velocidade de inspeção para aplicação da técnica em ferramentas de inspeção interna;
- Fabricação de sensores;
- Testes com *array* de sensores com configuração relevante para inspeção de campo;

A seguir serão detalhadas as atividades discutindo suas pertinências e as dificuldades associadas, assim como os materiais e equipamentos que foram utilizados.

#### **4.2.1 Testes de viabilidade da aplicação do sensor de correntes parasitas com configuração ortogonal para detecção de trincas em juntas soldadas de material cladeado**

Para os testes de viabilidade da técnica de correntes parasitas serão utilizadas chapas de material cladeado com substrato de aço carbono API 5L X65 revestido com Inconel 625. Esta combinação para o aço cladeado em estudo foi selecionada, pois dentre os diversos materiais utilizados nos dutos cladeados para exploração *offshore*, é a que associa a melhor resistência à corrosão dada pelo Inconel 625 e pela alta resistência mecânica, contribuição do API 5L X65 [10].

Foi decidido iniciar os testes com corpos de prova planos para facilitar o projeto mecânico e a montagem dos sensores para os ensaios automatizados. Na chapa cladeada, será inserido um cordão de solda com metal de adição igual ao revestimento, seguindo os procedimentos de soldagem utilizados em campo. Adjacente à raiz da solda será inserido um entalhe de eletroerosão. A figura 4.4 apresenta um esquemático de um dos corpos de prova fabricado para os testes de validação da técnica de correntes parasitas.

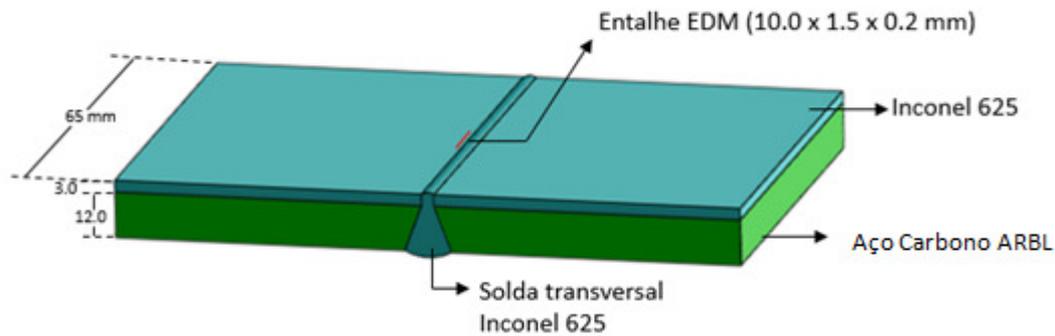


Figura 4.4: Esquemático do corpo de prova cladeado para testar a viabilidade da aplicação da técnica de correntes parasitas.

A sonda de correntes parasitas da fabricante Olympus, a ser testada no trabalho, possui configuração ortogonal e opera de forma diferencial. Sendo a faixa de frequência de operação da sonda entre 100 – 600 kHz. O equipamento a ser utilizado para alimentar a bobina e processar os dados é o Omniscan MX ECA também da fabricante Olympus.

#### 4.2.2 Estudo da representação de trincas de fadiga a partir de entalhes de eletroerosão

Para que seja possível utilizar entalhes de eletroerosão para representar trincas de fadiga, pretende-se desenvolver um estudo mais genérico que os apresentados por [31 e 32]. Diferentemente dos resultados obtidos por [31 e 32], onde a abertura e a profundidade dos entalhes influenciavam os sinais de inspeção, no presente estudo será considerada somente a influência da abertura das discontinuidades, o comprimento e a profundidade serão suficientemente grandes para não influenciarem os sinais de correntes parasitas.

Foi fabricado um corpo de prova do tipo CT (*Compact Tension*) para o ensaio de fadiga, com o objetivo de propagar uma trinca sem chegar a atingir a ruptura do corpo de prova, figura 4.5a. Após obtenção da trinca, montou-se um dispositivo para variar a

abertura da trinca para em seguida realizar o ensaio de correntes parasitas, conforme apresentado pela figura 4.5. O dispositivo consiste em encaixar dois pinos, nos mesmos furos passantes do corpo de prova CT que encaixam nas garras da máquina de fadiga. Em um dos pinos foi feito um furo com rosca interna e o outro ficou encaixado na peça servindo como batente. Um parafuso foi ajustado até encostar-se ao batente e, com o auxílio de um torquímetro, controlou-se o torque aplicado no parafuso, figura 4.5b. De acordo com o torque aplicado obter-se-á uma abertura correspondente da trinca de fadiga, onde, quanto maior o torque maior a força de tração para abrir a trinca. A figura 4.5c apresenta o percurso do sensor (linha pontilhada), onde foi realizado uma quantidade suficiente de medidas para que se tenha um conjunto de dados aceitável para análise estatística.

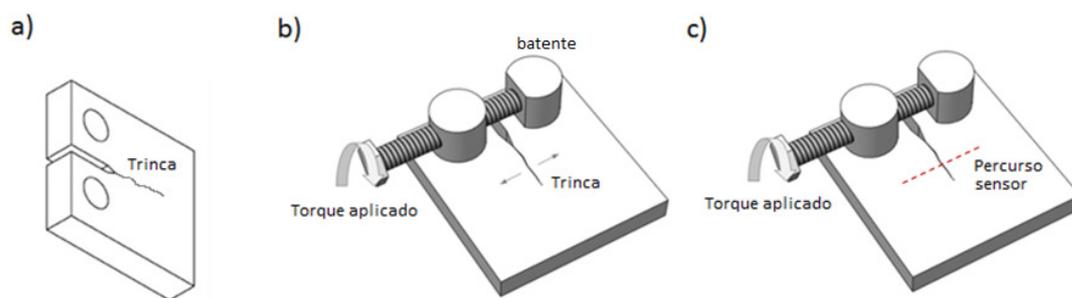


Figura 4.5: Esquemático do dispositivo fabricado para variação da abertura da trinca de fadiga.

Além do corpo de prova com a trinca de fadiga, foi usado um corpo de prova com entalhes de eletroerosão de diferentes aberturas, conforme ilustrado na figura 4.6. A partir dos resultados de inspeção dos corpos de prova foi feito uma correlação do módulo da variação da impedância com a abertura da descontinuidade inspecionada.



Figura 4.6: Ilustrativo do corpo de prova com entalhes de eletroerosão com diferentes aberturas.

### 4.2.3 Definição da frequência ótima de operação da sonda para detecção de defeitos

A frequência de operação é um dos principais parâmetros a ser definido no ensaio. Normalmente os fabricantes de sondas, visando aumentar a versatilidade de seus produtos, definem um espectro de frequência amplo para operação das sondas. A sonda ortogonal da Olympus, por exemplo, apresenta uma faixa de operação entre 100 e 600 kHz. E, conforme discutido na seção anterior, se durante o ensaio o inspetor optar pela menor frequência do intervalo (100 kHz), a sonda apresentará a maior profundidade de alcance, porém com a mais baixa sensibilidade do espectro.

Muitas vezes a frequência é definida de forma direta a partir da equação 3.1, onde se estima a profundidade que se deseja inspecionar e se calcula a frequência associada. Porém, a partir de tal prática é possível que se chegue a valores afastados da frequência ótima para inspeção, e, muitas vezes, conforme apresentado pelo trabalho [34], mesmo operando numa profundidade padrão menor que a dos defeitos a serem inspecionados é possível ainda dimensioná-los.

Outra maneira para selecionar a frequência de ensaio é através da definição empírica durante os testes de calibração, onde o inspetor ajusta os valores de frequência de acordo com os resultados alcançados e numa interação de tentativa e erro, determina a frequência a ser utilizada no teste. No entanto, em nenhuma das metodologias utilizadas é definido de forma criteriosa o valor da frequência ótima de inspeção.

O presente trabalho pretende estabelecer um procedimento específico de ensaio para determinar, de forma prática, a frequência ótima de operação da sonda e seu espectro de resposta em frequência. O procedimento consiste em:

- 1) Excitar a sonda com um sinal  $y(t)$  que seja a sintetização de senoides com diferentes frequências, equação 4.1, onde  $i$  é a frequência inicial e  $n$  a final do espectro que se deseja analisar;
- 2) Inspeccionar o corpo de prova de calibração, o qual possui propriedades eletromagnéticas e defeitos usinados próximos ao do material a ser inspeccionado em campo;
- 3) Decompor as frequências do sinal de inspeção a partir do algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT), determinando a componente de frequência que resultou na maior amplitude de inspeção.

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \sin(2\pi f_i \cdot t) \quad 4.1$$

A frequência que apresentar a maior amplitude no sinal de resposta da inspeção corresponderá à frequência ótima para inspeção de tal situação. Cabe mencionar que a frequência ótima é específica para cada situação, dependendo do material, tipo de defeito, e demais fatores.

#### **4.2.4 Testes de velocidade de inspeção para aplicação da técnica em ferramentas de inspeção interna.**

Para que seja possível aplicar a técnica de correntes parasitas em ferramentas de inspeção interna é preciso avaliar a capacidade de detecção da técnica quando operando em velocidades compatíveis com as de inspeção de campo. Com o auxílio de um braço

robótico com seis graus de liberdade, modelo KUKA KRC4 - HW, figura 4.7, diferentes velocidades de inspeção serão testadas. Devido às complicações geométricas será avaliado, além das possíveis posições da trinca em relação ao sentido de inspeção (trinca antes e depois da raiz), a capacidade de detecção mesmo com pequenos afastamentos da sonda. Poder operar com o sensor afastado do material resultaria em um menor desgaste e numa passagem mais suave pela raiz da solda. A figura 4.8 apresenta uma matriz de testes iniciais a serem feitos com as combinações de velocidade, variando de 0,2-1,0 m/s, e *lift-off* entre 0,0-1,0 mm.



Figura 4.7: KUKA KRC4 – HW, fotografia do braço robótico a ser utilizado para assistir os ensaios com diferentes velocidades.

0,0mm. 0,2m/s	0,2mm. 0,2m/s	0,5mm. 0,2m/s	1,0mm. 0,2m/s
0,0mm. 0,5m/s	0,2mm. 0,5m/s	0,5mm. 0,5m/s	1,0mm. 0,5m/s
0,0mm. 1,0m/s	0,2mm. 1,0m/s	0,5mm. 1,0m/s	1,0mm. 1,0m/s

Figura 4.8: Matriz de ensaios combinando velocidades de inspeção com *lift-offs*.

Cabe mencionar que não foram encontradas publicações na literatura que consideram a velocidade de inspeção para detecção de defeitos em juntas soldadas.

#### **4.2.5 Testes com *array* de sensores com configuração relevante para inspeção de campo**

Para que seja possível a aplicação em campo, é preciso testar em ambiente laboratorial arranjos relevantes, com matriz de sensores inspecionado amostras cladeados. O braço robótico, apresentado na figura 4.7 foi instrumentado com um *array* de sensores, simulando dessa forma em laboratório a inspeção a ser realizada em campo. Nesta configuração de ensaio foram avaliadas diversas condições de projeto, como por exemplo, acomodação do sensor durante varredura, resolução da ferramenta, etc., que servirão de *input* para um projeto futuro de fabricação da ferramenta a ser aplicada em campo.

Para os testes com *array* de sensores foi preciso integrar a eletrônica de excitação e processamento dos dados com o sistema de transporte dos sensores (braço robótico), o qual teve sua programação de inspeção controlada por um aplicativo externo (computador). A figura 4.9 apresenta um esquemático prático da integração entre os dispositivos necessários para o sistema de inspeção automatizado. Onde, a eletrônica alimenta os sensores acoplados no braço robótico e envia através de uma interface USB a variação de fase e amplitude da impedância dos sensores para o computador; via computador é programada a rota de inspeção do braço robótico, o qual durante o trajeto de inspeção envia a posição dos sensores para o computador. Por fim, os dados de posição são sincronizados com os dados de resposta dos sensores, onde são plotados os resultados de inspeção.

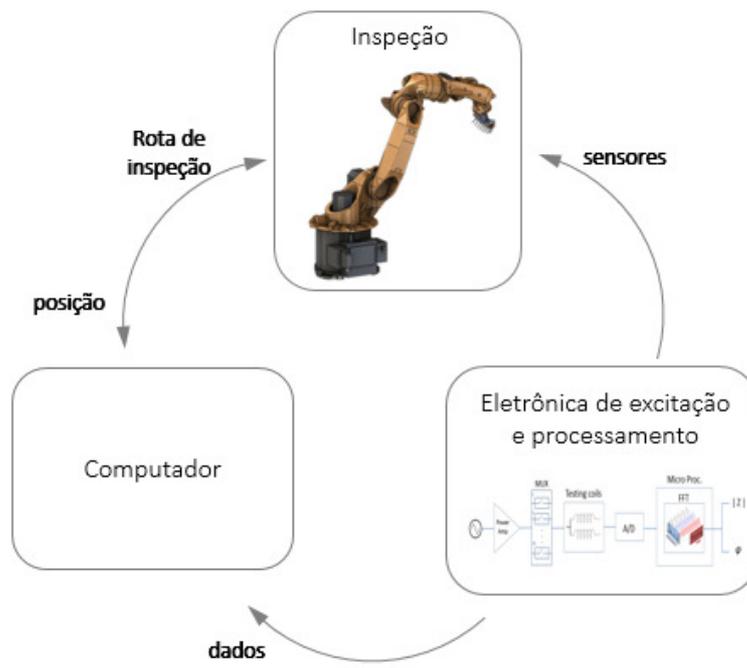


Figura 4.9: Esquemático para o sistema de inspeção automatizada.

## **5. Apresentação e análise dos resultados**

### **5.1 Testes de viabilidade da aplicação do sensor de correntes parasitas para detecção de trincas em juntas soldadas**

#### **5.1.1 Fabricação dos corpos de prova**

Para a fabricação dos corpos de prova foram utilizadas quatro chapas cladeadas de aço carbono revestido com Inconel 625, com dimensões de 200 x 60 x 15 mm. As chapas foram doadas pela empresa alemã *Butting*, fornecedora mundial de dutos cladeados para aplicação *offshore*. Considerando o processo de fabricação dos dutos cladeados, destaca-se que as chapas doadas seguiram o processo regular de fabricação, não sendo submetidas somente pelo processo final de conformação mecânica para assumir o formato tubular.

Para análise metalúrgica dos metais que compõem o corpo de prova foram realizados alguns ensaios metalográficos. Para revelação da microestrutura do aço carbono foi utilizado uma solução de Nital 2%, enquanto que para revelar a matriz austenítica da liga de níquel utilizou-se um ataque eletrolítico com ácido crômico com 3 Volts por 30 segundos.

Com o objetivo de avaliar a interface de cladeamento alcançada durante o processo de fabricação das chapas, foi destacada uma amostra com dimensões 10 x 10 x 15 mm para análise em microscópio ótico e eletrônico de varredura. A figura 5.1 apresenta uma micrografia da interface de cladeamento, onde é possível visualizar o aço carbono, o Inconel 625, e a interface que une metalurgicamente os dois materiais. Na imagem, é possível visualizar ainda uma reta vertical que indica os pontos utilizados para traçar o perfil da composição química ao longo da interface de cladeamento, a partir de medidas de EBSD (*Electron Backscatter Diffraction*). O objetivo da análise da composição química é verificar exatamente a região de transição entre os materiais. O gráfico da figura 5.1 apresenta o teor de níquel, cromo e ferro nos seis pontos indicados na micrografia onde foram realizadas as análises da composição química.

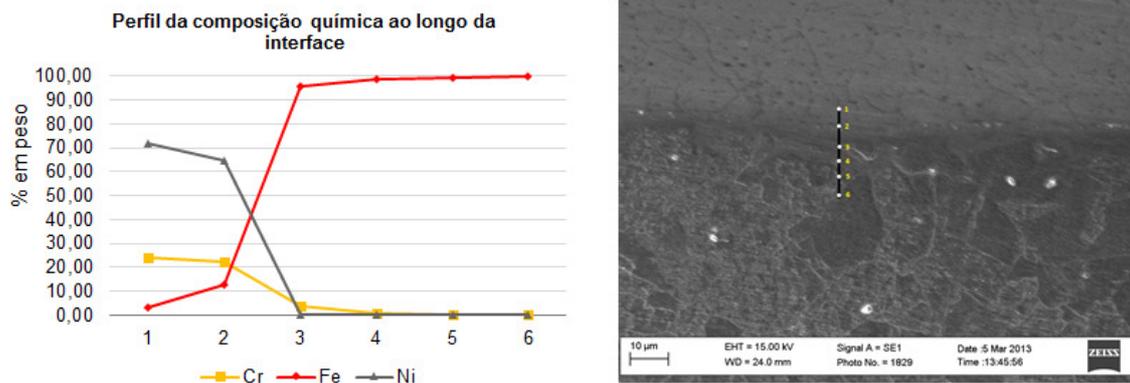


Figura 5.1: Micrografia da interface de cladeamento do Inconel com o aço carbono (à direita) e gráfico com o perfil da composição química ao longo da interface (à esquerda).

Conforme observado pelo gráfico, à medida que se percorre a interface de cladeamento, de cima (ponto 1) para baixo (ponto 6) na micrografia, saindo da liga de níquel e entrando no aço carbono, verifica-se uma acentuada queda no teor de níquel e cromo e um aumento significativo no teor de ferro. Combinando os resultados do perfil da composição química apresentado pelo gráfico e a micrografia da figura 5.1, é possível verificar a tênue região de transição ( $\approx 3 \mu\text{m}$ ) que confere a ligação metalúrgica entre os materiais, a qual é obtida através da difusão do carbono na matriz austenítica durante o processo de cladeamento a partir da laminação a quente dos materiais [41].

A figura 5.2 apresenta um desenho esquemático simplificado do processo de fabricação de um duto cladeado dividido em cinco etapas. Na etapa 1, a chapa do substrato e do revestimento são sobrepostas para em seguida serem submetidas ao processo de laminação a quente (etapa 2). Após a laminação é conferida a união metalúrgica entre os materiais (etapa 3) e a chapa já cladeada é submetida ao processo de conformação mecânica para atingir o formato tubular (etapa 4). Por fim, é realizado uma solda longitudinal (etapa 5) para concluir a fabricação do tubo cladeado. Esta solda longitudinal não é um ponto crítico para inspeção, diferentemente das soldas circunferenciais para conexão dos segmentos de dutos, conforme discutido anteriormente no Capítulo 2. É destacado que as chapas utilizadas para fabricação dos corpos de prova no presente trabalho seguiram o processo de fabricação até a etapa 3.

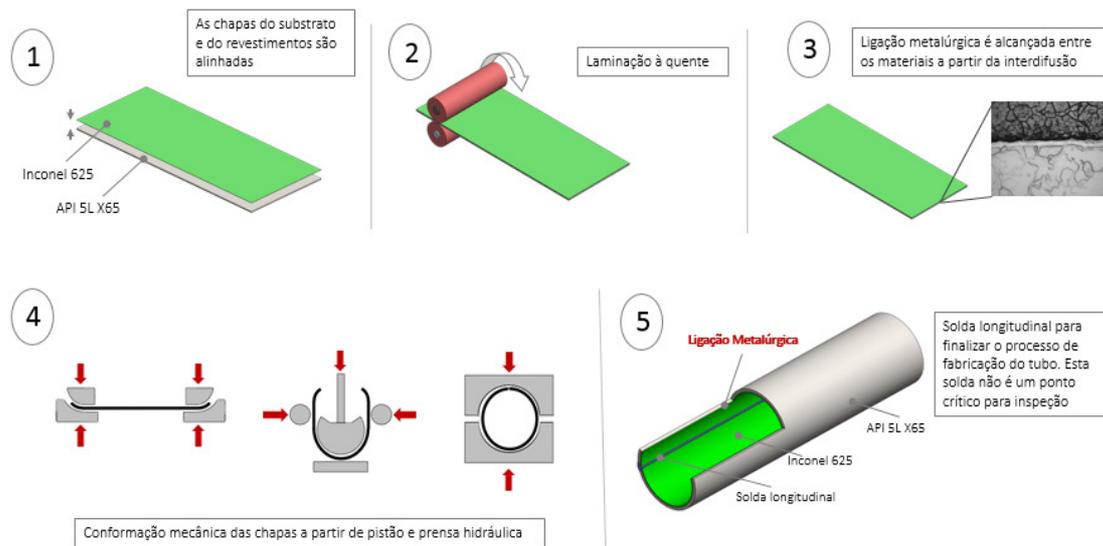


Figura 5.2: Esquemático simplificado do processo de fabricação do duto cladeado em estudo.

Para finalização da fabricação dos corpos de prova para os testes de correntes parasitas, as chapas foram usinadas com um chanfro de  $30^\circ$  para receber posteriormente uma junta soldada com material de enchimento também em Inconel 625. Esta soldagem objetiva reproduzir as soldas circunferenciais para conexão dos segmentos de dutos e foi alcançada a partir do processo GTAW, seguindo a mesma especificação utilizada nas soldas circunferenciais de dutos em operação *offshore*. Por fim, ao longo da raiz da solda, na interface com o metal de base, foi usinado um entalhe de eletroerosão em cada corpo de prova com dimensões de 10,0 mm de comprimento x 0,2 mm de abertura e profundidades de 1,0, 1,5, 2,0 e 3 mm. A figura 5.3 apresenta uma fotografia de um dos corpos de prova cladeado fabricado. Na seção A-A é possível visualizar a geometria e posição do entalhe inserido e; a seção B-B apresenta o cordão de solda em Inconel 625 atacado com ácido crômico, onde é possível visualizar os passes do cordão de solda. A figura 5.4 apresenta uma fotografia dos quatro corpos de prova fabricados.

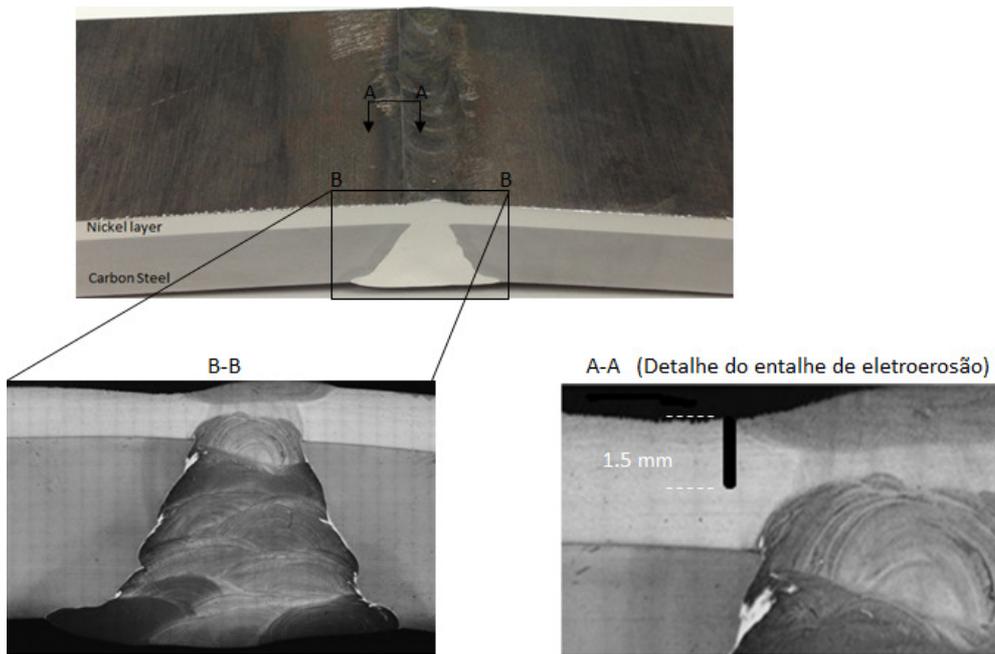


Figura 5.3: Fotografia do corpo de prova em material cladeado. Seção A-A: seção transversal do entalhe de eletroerosão. Seção B-B: detalhamento do cordão de solda.

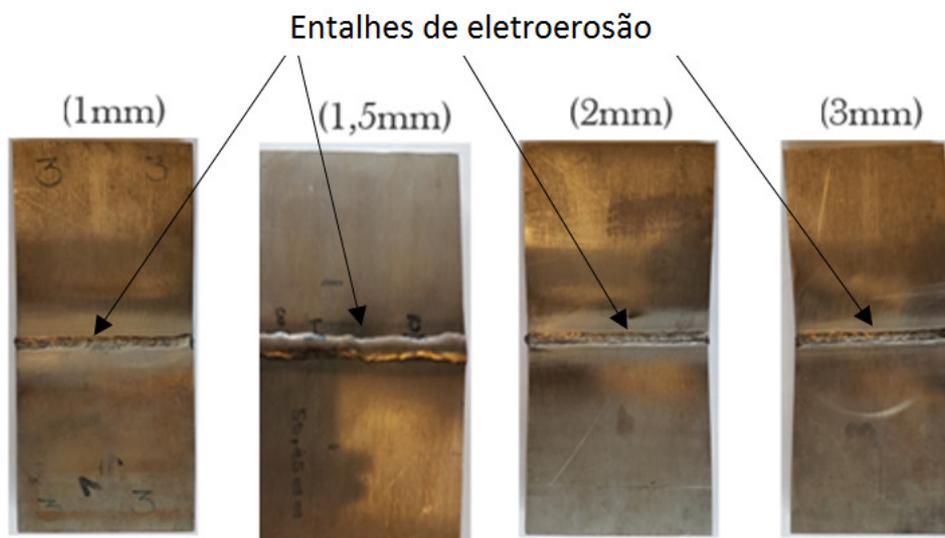


Figura 5.4: Corpos de prova cladeados com entalhes de eletroerosão com diferentes profundidades.

### **5.1.2 Simulação computacional para avaliação do comportamento das correntes induzidas a partir da configuração ortogonal**

Em regra geral a simulação computacional tem como uma das finalidades principais a execução de um modelo matemático que reproduza em detalhes o sistema real de modo a estudar o seu comportamento. Portanto, o objetivo da simulação no presente trabalho é via um modelo virtual estudar o comportamento das correntes induzidas geradas a partir das bobinas com configuração ortogonal.

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. 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. 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’. A essa divisão do domínio se dá o nome de malha ou do inglês *grid*. A partir desta divisão, ao invés de se buscar uma função que satisfaça as condições para todo o domínio, essas funções devem ser definidas em cada elemento.

Os trabalhos produzidos por Rocha e Camerini [42 e 43] apresentam em detalhes as equações utilizadas para o cálculo do vetor potencial magnético, enquanto os apresentados por Rebello e Theodoulidis [44 e 45] apresentam as equações utilizadas para o cálculo da variação da impedância das bobinas simuladas. Sendo objetivo do presente trabalho a avaliação do comportamento das correntes induzidas de maneira qualitativa, tais equações fogem do escopo e não serão apresentadas.

O *software* utilizado para simulação eletromagnética foi o MagNet da empresa Infolytica. A figura 5.5 apresenta a geometria do enrolamento de uma camada de cada bobina, ortogonalmente dispostas entre si, enquanto a figura 5.6 apresenta o resultado das correntes induzidas geradas a partir da interação das duas bobinas, dando origem à sonda ortogonal.

Pela figura 5.6, a partir da configuração das correntes induzidas é possível observar os eixos de resposta da sonda, destacados na figura pelas linhas pontilhadas em

vermelho. No eixo a  $0^\circ$ , que é correspondente ao eixo a  $90^\circ$ , se alcança à máxima concentração de correntes induzidas, enquanto que no eixo traçado a  $45^\circ$  é observado a menor densidade de corrente, o que corresponde ao eixo de resposta nula da sonda. Este resultado corrobora o descrito pelo trabalho apresentado por Hansen [35].

A partir dos resultados obtidos através da simulação chegou-se ao entendimento do comportamento espacial das correntes induzidas obtidas a partir da configuração ortogonal. A figura 5.7 apresenta nos pontos 1, 2 e 3, um esquemático simplificado do comportamento das correntes induzidas. Sendo em 1 apresentado as linhas das correntes geradas pelas bobinas ortogonalmente dispostas; em 2 a região de influência das mesmas correntes induzidas; e em 3 a interação da conexão diferencial que resulta nos eixos de máxima e mínima resposta do sensor. Conforme mencionado por [35] e apresentado no ponto 3 da figura 5.7, é fundamental que o eixo de máxima resposta da sonda incida perpendicularmente ao comprimento do defeito.

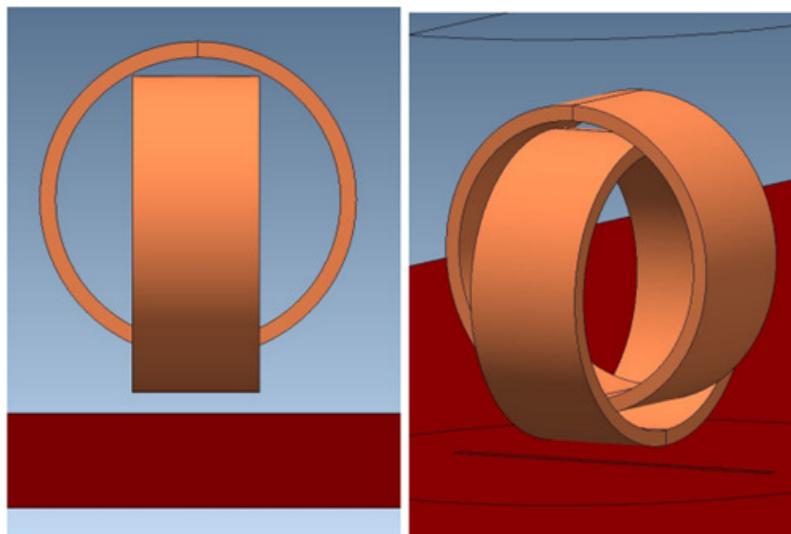


Figura 5.5: Modelo utilizado para a simulação da sonda ortogonal.

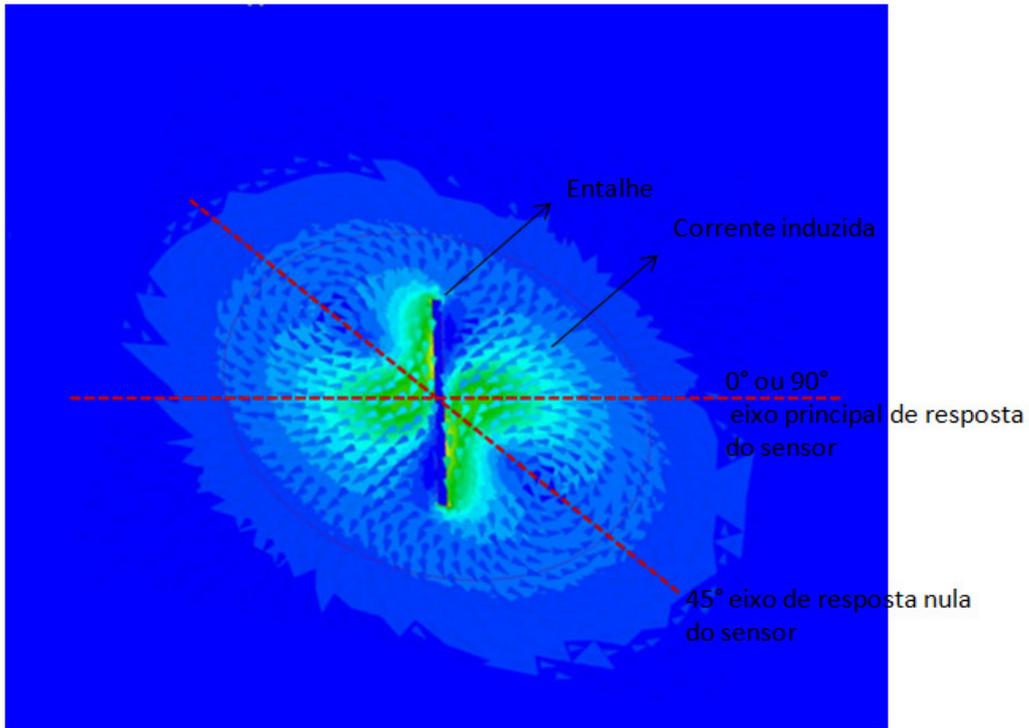


Figura 5.6: Resultante das correntes induzidas geradas pelas duas bobinas sobre a chapa com a sonda posicionada exatamente sobre o entalhe.

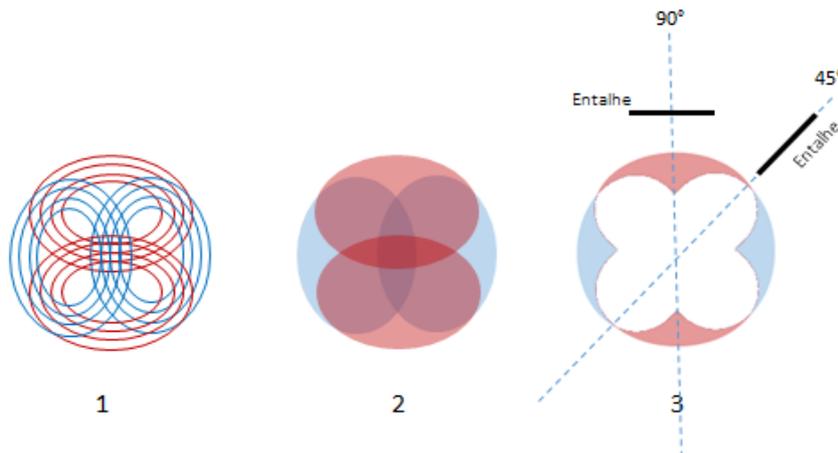


Figura 5.7: Comportamento das correntes induzidas devido a configuração ortogonal e conexão diferencial entre as bobinas. Onde: 1) apresenta as linhas das correntes geradas pelas bobinas ortogonalmente dispostas; 2) a região de influência das mesmas correntes induzidas; e 3) a interação da conexão diferencial que resulta nos eixos de máxima e mínima resposta do sensor.

### 5.1.3 Inspeção de juntas soldadas com sensores de correntes parasitas com configuração ortogonal

Durante a inspeção do corpo de prova foi utilizada a sonda de correntes parasitas com configuração ortogonal operando de forma diferencial, cujas vantagens e características foram apresentadas nas seções anteriores (3 e 4). Para alimentação do sensor e aquisição de dados, utilizou-se o equipamento de correntes parasitas *Omniscan* da Olympus. A figura 5.8a apresenta uma fotografia da sonda e a 5.8b do equipamento de correntes parasitas empregado. Para estes ensaios a frequência do sinal de excitação utilizada foi 400 kHz, a qual foi definida de forma empírica, ainda sem uma avaliação criteriosa do espectro de resposta em frequência da sonda. Uma análise para otimização da frequência será mostrada adiante no item 5.2 deste capítulo.

As inspeções foram realizadas com o auxílio de um braço robótico de seis graus de liberdade, o que permitiu a realização da varredura em todo o corpo de prova, possibilitando, dessa forma, a geração de uma imagem do tipo *C-Scan* para os valores de resistência, reatância indutiva, amplitude e fase da variação da impedância elétrica. A figura 5.9 apresenta uma ilustração do percurso realizado pelo sensor durante a varredura do corpo de prova cladeado com entalhe de 1,5 mm de profundidade.



Figura 5.8: a) Sonda de correntes parasitas com configuração ortogonal utilizada para inspeção do corpo de prova fabricado e b) Equipamento de correntes parasitas *Omniscan* MX ECA da Olympus.

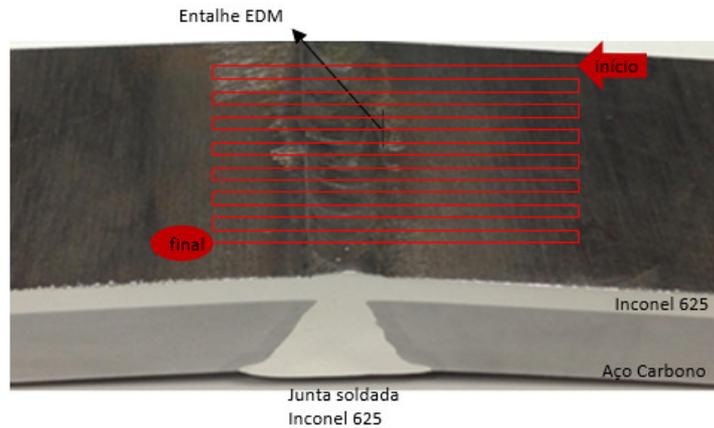


Figura 5.9: Percurso do sensor durante a inspeção automatizada com a indicação da posição do início e término da inspeção.

A partir da varredura realizada foi possível reconstruir a região inspecionada com os sinais da componente real (resistência) e imaginária (reatância indutiva) da impedância elétrica. As figuras 5.10 e 5.11 apresentam o *C-Scan* da inspeção do corpo de prova. Nota-se que, em ambos os resultados de inspeção, é possível identificar a raiz da solda e o entalhe de eletroerosão inserido na interface da raiz da solda com o metal base.

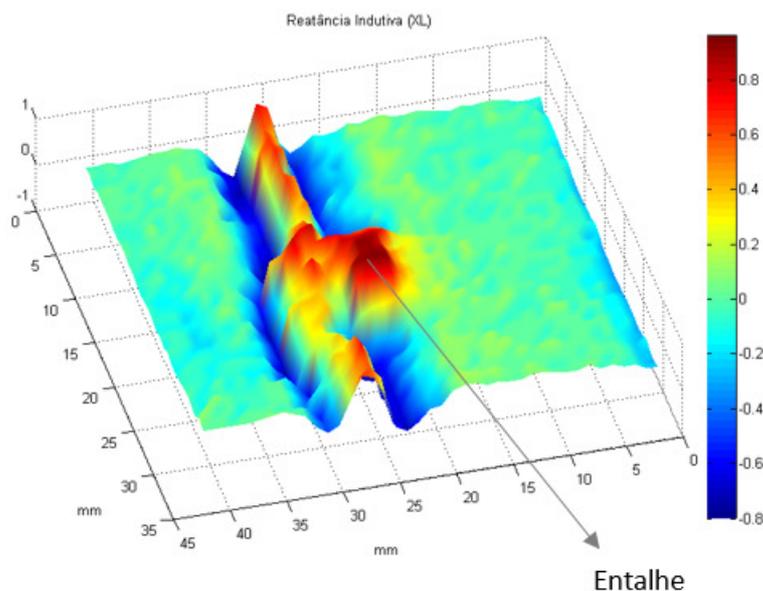


Figura 5.10: *C-Scan* do corpo de prova cladeado com o resultado da componente imaginária da impedância elétrica, reatância indutiva. Em destaque o entalhe de eletroerosão inserido.

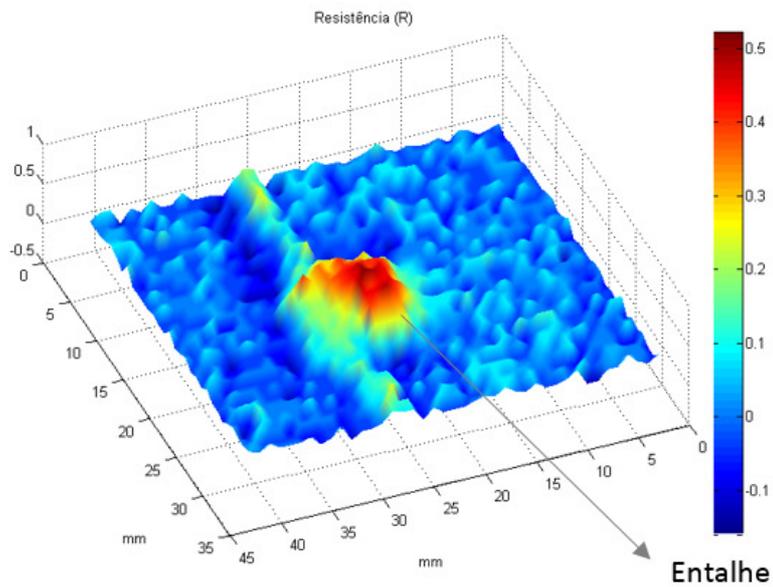


Figura 5.11: *C-Scan* do corpo de prova cladeado com o resultado da componente real da impedância elétrica, resistência. Em destaque a posição do entalhe de eletroerosão inserido.

Em ambas as componentes é possível identificar uma indicação característica do entalhe de eletroerosão. Com o objetivo de comparar o sinal de varredura da solda com e sem a influência da descontinuidade, foi avaliada a diferença entre o sinal obtido na região do entalhe com o da região sem a presença do entalhe, ao destacar dois sinais que compõem o mapa *C-Scan*.

As figuras 5.12 e 5.13 apresentam os resultados da varredura com a indicação (pontilhado) das linhas do *C-Scan* que foram destacadas para análise, e, logo abaixo, a curva dos sinais selecionados. Com relação à análise dos sinais, é possível verificar a assinatura característica da solda e do entalhe na componente resistiva e indutiva. No resultado da resistência, figura 5.12, é possível notar um aumento de aproximadamente 6 dB na amplitude do sinal em relação ao cordão de solda devido à presença do entalhe. Enquanto que, no resultado da reatância indutiva, figura 5.13, nota-se que a presença do entalhe altera a assinatura do sinal do cordão de solda, apresentando um pico adjacente ao da indicação da solda.

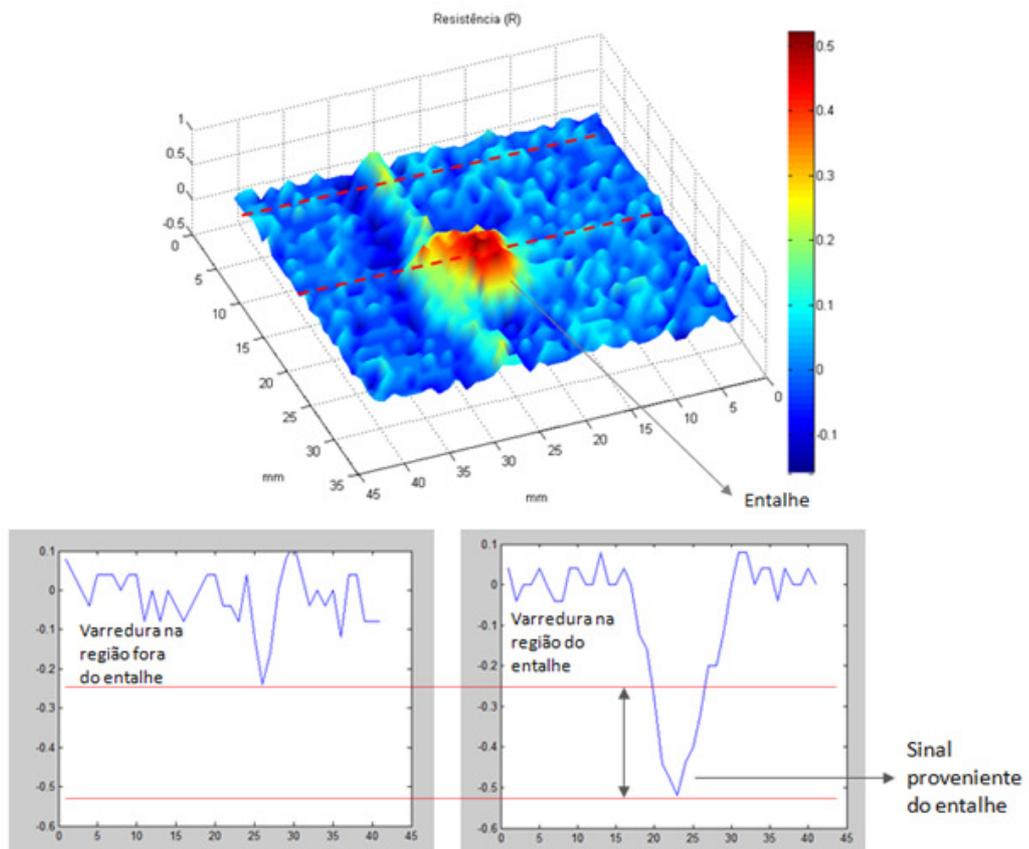


Figura 5.12: Análise das assinaturas da componente resistiva dos sinais de inspeção sobre o entalhe de eletroerosão e fora do entalhe.

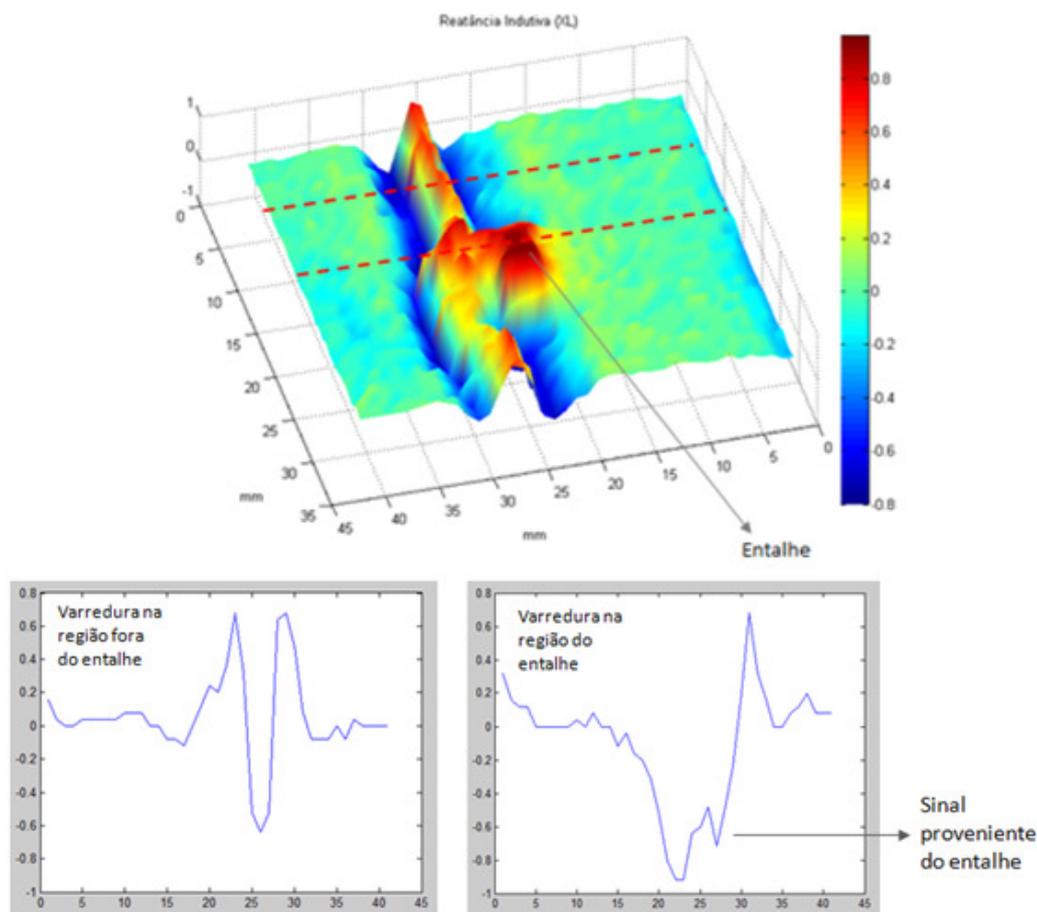


Figura 5.13: Análise das assinaturas da componente indutiva dos sinais de inspeção sobre o entalhe de eletroerosão e fora do entalhe.

Os resultados alcançados na inspeção de juntas soldadas de material cladeado com substrato de X65 revestido com Inconel 625, a partir de sensores diferenciais de correntes parasitas com configuração ortogonal, mostraram que é possível a identificação de entalhes de eletroerosão localizados na interface entre a raiz da solda e o metal de base. As assinaturas dos sinais de varredura da junta soldada modificam com a presença do entalhe tanto na reatância indutiva quanto na resistência. Indicando assim, que a técnica de correntes parasitas se apresenta como uma potencial solução para instrumentar ferramentas de inspeção interna e detectar trincas de fadiga em soldas circunferenciais de dutos cladeados.

## 5.2 Definição da frequência ótima de operação da sonda para detecção de defeitos

Sendo a frequência de operação um dos principais parâmetros a ser definido no ensaio de correntes parasitas, e, conforme discutido, em muitas ocasiões definida de sem uma avaliação embasada e criteriosa sobre o melhor valor de frequência para determinada situação de inspeção. Os resultados obtidos e descritos no item 5.1 mostraram o potencial da técnica de correntes parasitas com sensor de configuração ortogonal, na identificação de entalhes de eletroerosão localizados na interface entre a raiz da solda e o metal de base. Face a esses bons resultados fez-se necessário uma análise da frequência ótima de inspeção, onde foi desenvolvido um procedimento de ensaio experimental, que consiste em determinar de forma específica a frequência ótima de operação da sonda ortogonal de acordo com a situação de inspeção a ser enfrentada.

A primeira etapa do procedimento consiste na fabricação de um corpo de prova com as mesmas propriedades eletromagnéticas do material que se deseja inspecionar em campo, e com os mesmos parâmetros da descontinuidade para qual se deseja otimizar a frequência de inspeção. Considerando-se que a avaliação da frequência ótima para identificação de trincas superficiais perpendiculares à direção de inspeção é o objetivo do atual trabalho, foi fabricado um corpo de prova para tal situação. A figura 5.14, apresenta um esquemático da chapa de Inconel 625 fabricada, com dimensões 150 x 80 x 3 mm, e com um entalhe de eletroerosão usinado no centro da chapa com dimensões de 10 x 1,5 x 0,2 mm. A linha pontilhada na figura indica o percurso da sonda durante inspeção.

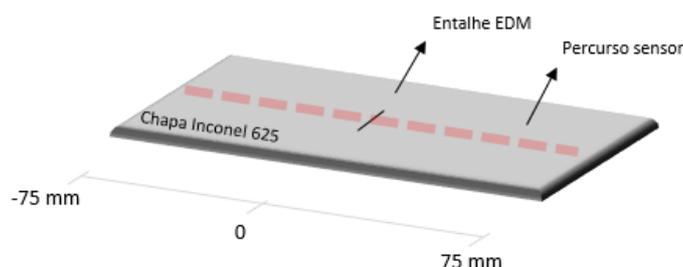


Figura 5.14: Corpo de prova fabricado para definição da frequência ótima de inspeção.

Para excitação da sonda foi utilizado um sinal  $y(t)$  que corresponde à sintetização de senóides de diferentes frequências, conforme indicado pela equação 5.1; onde, o  $A_0$  é a constante de amplitude das ondas senoidais,  $f$  a frequência de oscilação,  $\varphi$  a fase,  $t$  o tempo,  $i$  é o índice do vetor com os valores de frequências a serem testadas e  $N$  tamanho do vetor de frequências.

Com a sonda alimentada a partir do sinal  $y(t)$  se inspeciona o corpo de prova com o entalhe de eletroerosão e, no sinal de resposta da inspeção, se aplica transformada de Fourier para avaliar no domínio da frequência a componente de frequência que apresentou a maior variação de amplitude, a qual será definida como frequência ótima para inspecionar determinada situação.

$$y(t) = A_0 \sum_{i=0}^{N-1} \text{sen}(2\pi f_i \cdot t + \varphi_i) \quad 5.1$$

Para análise da resposta do sinal de inspeção no domínio da frequência foi utilizado a transformada de Fourier discreta, equação 5.2, onde,  $Y_k$  é a resposta no domínio da frequência ou, coeficiente de Fourier, do sinal analisado para a  $k$ ésima frequência,  $i$  o índice das amostras do sinal discreto,  $N$  número total de amostras,  $y_i$  o valor da amostra  $i$  no domínio do tempo e  $j$  o operador complexo. Para solução da transformada de Fourier foi utilizado o algoritmo da transformada rápida de Fourier, do inglês *fast Fourier transform*, FFT.

$$Y_k = \sum_{i=0}^{N-1} y_i \cdot e^{-\frac{j2\pi ki}{N}} \quad 5.2$$

Como efeito de ilustração do funcionamento do algoritmo para definição da frequência ótima de inspeção, a figura 5.15 apresenta um exemplo de seis ondas senoidais com diferentes frequências de oscilação (1, 2, 5, 10, 20 e 50 kHz,

respectivamente). A figura 5.16 apresenta a função das frequências sintetizadas a partir da equação 5.1, a qual será utilizada para alimentação da sonda. A figura 5.17 apresenta um exemplo do sinal de resposta de inspeção do corpo de prova, mostrado na figura 5.14, com a bobina alimentada com o sinal da figura 5.16, enquanto a figura 5.18 apresenta o espectro de frequência após a aplicação da FFT no sinal da figura 5.17. Pelo espectro é possível verificar que a frequência de 50 kHz apresentou a maior amplitude, indicando que, dentre as frequências de excitação utilizadas no exemplo, a de 50kHz é a mais indicada para inspeção do corpo de prova.

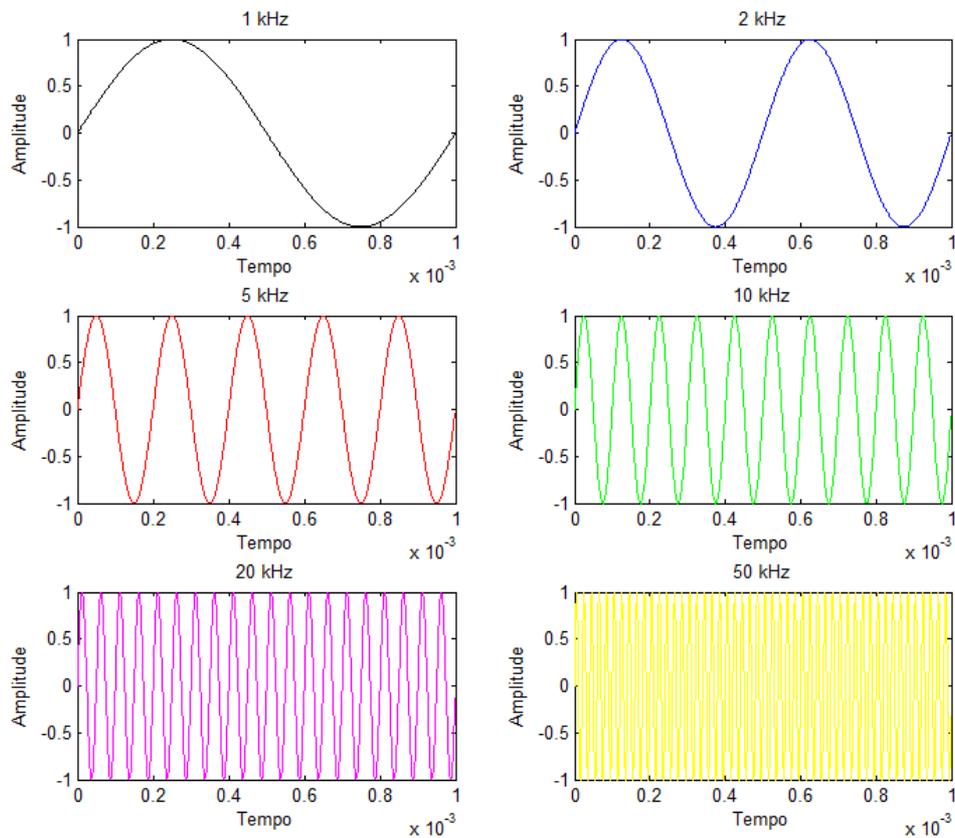


Figura 5.15: Senóides com diferentes frequências de oscilação (1, 2, 5, 10, 20 e 50 kHz, respectivamente).

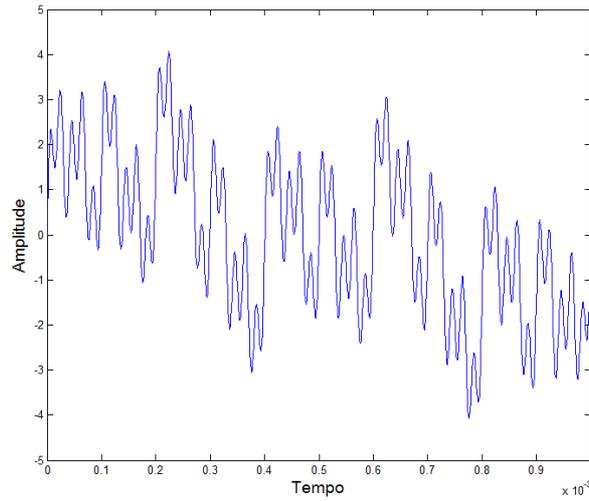


Figura 5.16: Sinal de excitação da sonda ortogonal obtido a partir da sintetização das frequências apresentadas na figura 5.15.

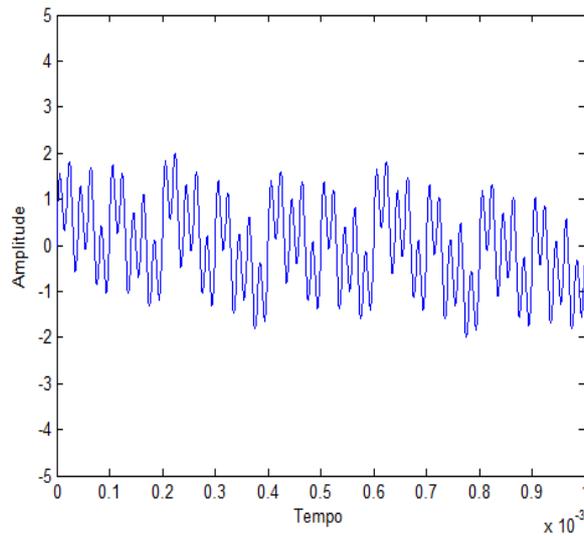


Figura 5.17: Sinal de resposta e inspeção do corpo de prova com entalhe de eletroerosão com a sonda alimentada com o sinal da figura 5.15.

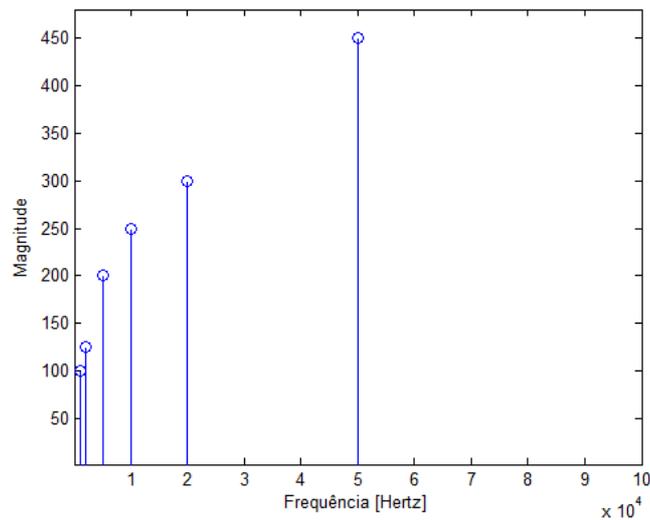


Figura 5.18: Análise no domínio da frequência do sinal de resposta de inspeção, onde é possível visualizar a principal magnitude do espectro em 50kHz.

Uma vez esclarecido o algoritmo e o procedimento para definição da frequência ótima de operação da sonda, compreende-se que é preciso a aplicação de um sinal para alimentação da sonda que contemple todo seu intervalo de frequência de operação. A função do sinal de excitação utilizada na sonda considerou o intervalo de frequências entre 1 e 700 kHz, com um incremento entre as frequências de 10 kHz. A partir do sinal de excitação definido, foram realizadas três inspeções no corpo de prova para que pudesse ser realizada uma análise mínima de dispersão dos dados. A figura 5.19 apresenta o espectro de frequência do sinal de resposta da inspeção da sonda em cima do defeito, onde a linha pontilhada indica a frequência ótima para identificação do entalhe no corpo de prova, 260 kHz.

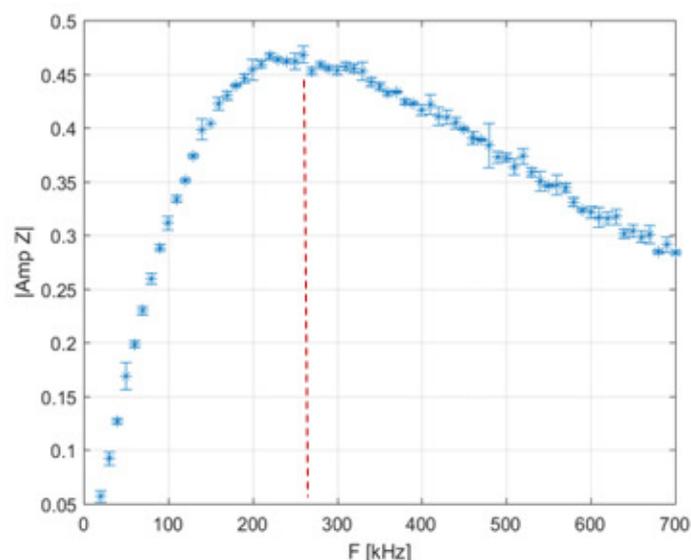


Figura 5.19: Variação do módulo da impedância em função da frequência de excitação. A partir do espectro de frequência do sinal de resposta da inspeção da sonda é possível definir a frequência ótima de inspeção.

Cabe destacar que a frequência utilizada nos testes iniciais (seção 5.1.2), 400 kHz, apresenta um sinal com amplitude atenuada em 0,8 dB em relação à frequência de 260 kHz. Dessa forma, verifica-se que os resultados alcançados na inspeção de entalhes em juntas de chapas cladeadas, figuras 5.12 e 5.13, podem ainda ser aprimorados.

A figura 5.20 apresenta um gráfico em três dimensões que ilustra o resultado de cada frequência do sinal de inspeção ao longo do corpo de prova. Sendo o eixo das ordenadas: os valores das frequências utilizadas no sinal de excitação; e nas abscissas: a posição do sinal de resposta da inspeção no corpo de prova, onde o centro do entalhe está localizado na posição 0 (figura 5.14). O mapa de cores indica o valor da amplitude da variação da impedância.

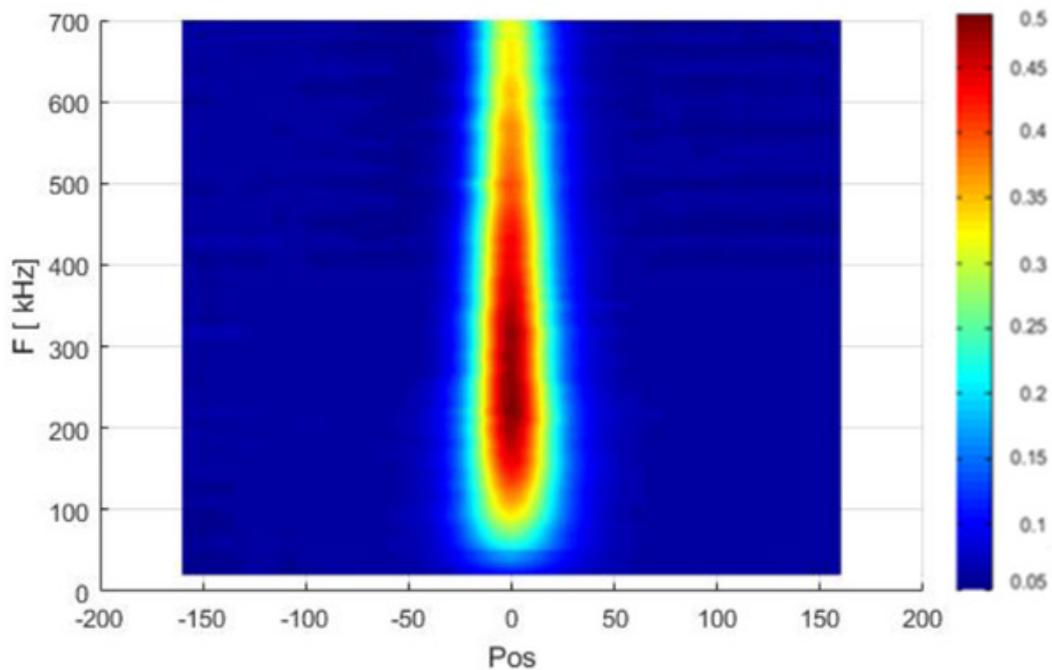


Figura 5.20: Análise da resposta em frequência da inspeção do corpo de prova, onde é possível identificar a faixa de operação do sensor entre 100 e 600 kHz e definir a frequência ótima para inspecionar descontinuidades superficiais em Inconel 625.

Através de uma análise detalhada do gráfico, é possível extrair algumas informações relevantes. Além da frequência ótima definida em 260 kHz, é possível observar que ao selecionar a linha vertical da posição 0 no gráfico, abrangendo todas as frequências exatamente em cima do entalhe, se tem o mesmo gráfico apresentado pela figura 5.19. Em baixas frequências, apesar de resultar em sinais de menor amplitude, o sensor é influenciado antes pela presença do entalhe, devido à maior profundidade de penetração das correntes induzidas. Tal fato gera esse efeito que lembra uma “chama de vela”, onde, à medida que se aumenta a frequência, o entalhe só é identificado com o sensor bem próximo. Além disso, ressalta-se ainda no gráfico, a faixa de operação da sonda, onde abaixo de 100 kHz e acima de 600 kHz é possível perceber uma menor resposta do sensor. A definição da melhor faixa para inspeção entre 100 e 600 kHz encontrada corrobora com a definição indicada pelo fabricante do sensor.

Cumprе mencionar que apesar da metodologia ter sido desenvolvida especificamente para o problema em questão, esta foi baseada nos estudos publicados

por Chady *et.al.* [46] onde foram utilizados testes com sinais de multifrequência para dimensionar a profundidade de diferentes entalhes de eletroerosão. Ou seja, para um determinado defeito, quanto maior sua dimensão de profundidade menor era a frequência que apresentava a principal variação de impedância, sendo feito, por fim, uma correlação direta entre a frequência ótima de inspeção e a profundidade do defeito.

### **5.3 Representação de trincas de fadiga a partir de entalhes de eletroerosão**

Visando utilizar entalhes de eletroerosão para representar trincas de fadiga foi realizado um estudo comparativo entre os sinais obtidos através de entalhes de eletroerosão com os sinais alcançados na inspeção de trincas de fadiga. Os entalhes e a trinca são passantes e estão inseridos em corpos de prova que possuem uma espessura suficientemente grande para não influenciar o sinal. A figura 5.21 apresenta como a profundidade de penetração padrão das correntes induzidas se relaciona com a frequência do ensaio para o Inconel 625. A frequência utilizada no ensaio foi a otimizada, 260 kHz, que resulta em uma profundidade de alcance das correntes parasitas de 1,1 mm. Sendo a espessura dos corpos de prova para o presente teste de 5 mm, isto é, quase cinco vezes maior que a profundidade de penetração padrão, e lembrando que decaimento da densidade de corrente segue uma função exponencial em relação a profundidade, conclui-se que a espessura dos corpos de prova utilizados no ensaio não influencia os sinais de inspeção.

Dessa forma, no presente estudo será considerado somente a influência da abertura das descontinuidades, uma vez que o comprimento e a profundidade das mesmas são suficientemente grandes para não influenciarem os sinais de correntes parasitas.

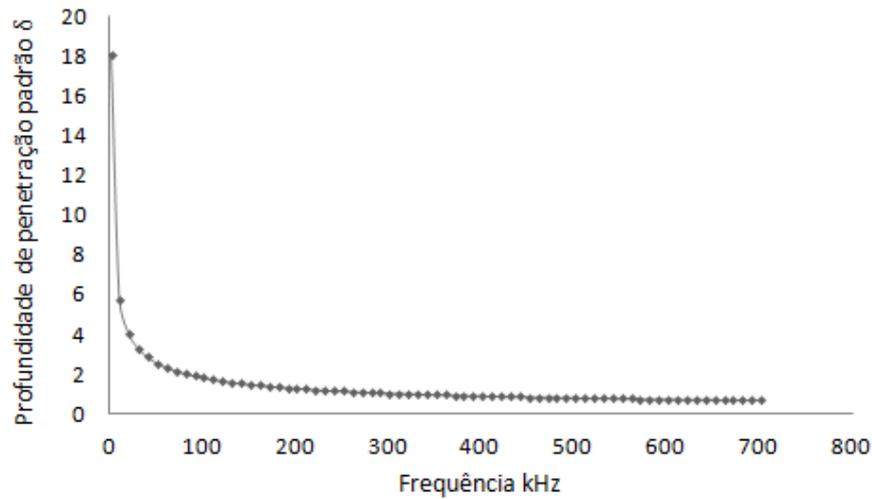


Figura 5.21: Profundidade de penetração em função da frequência do ensaio para a liga de Níquel Inconel 625.

A figura 5.22 apresenta o corpo de prova fabricado com 10 entalhes de eletroerosão com diferentes aberturas. As aberturas foram medidas com o auxílio de um microscópio ótico e variaram entre 0,16 e 0,40 mm. Vale destacar a dificuldade de conseguir entalhes de eletroerosão com aberturas menores que 0,2 mm. Para tal, é preciso trabalhar com a tecnologia de eletroerosão a fio, via eletrodo não é possível alcançar aberturas menores que 0,2 mm principalmente com grandes profundidades, além disso, mesmo utilizando fios de cobre com diâmetros na ordem de 0,10 mm, as folgas da máquina e as limitações do processo dificultam a obtenção de entalhes menores que 0,16 mm.

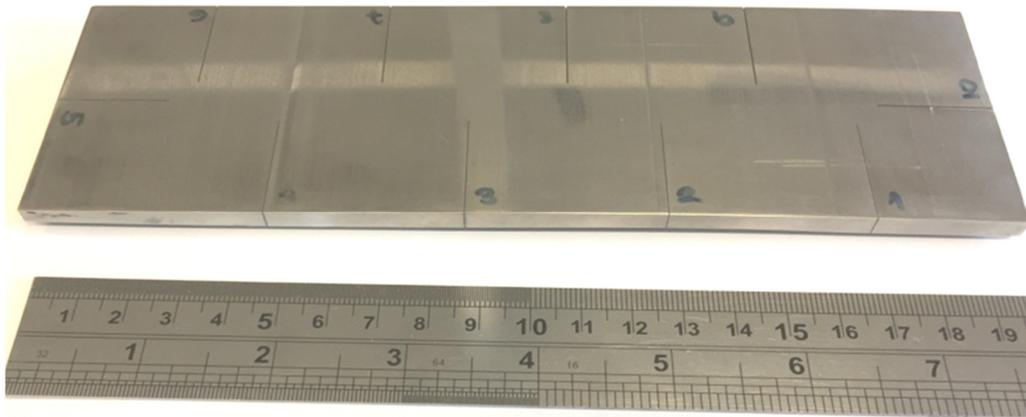


Figura 5.22: Corpo de prova fabricado em Inconel 625 com 10 entalhes de eletroerosão com aberturas variando entre o intervalo de 0,16 e 0,40 mm.

A trinca de fadiga no momento em que o corpo de prova é retirado do ensaio apresenta uma abertura bastante aguda na ordem de 10 - 20  $\mu\text{m}$ , figura 5.23. Tal característica aliada à dificuldade de se conseguir entalhes de eletroerosão menores que 0,16 mm faz com que se tenha um intervalo de abertura muito grande, aproximadamente um fator de 10, entre os defeitos usinados por eletroerosão e a trinca real de fadiga. Tendo em vista a dificuldade de se conseguir entalhes com menores aberturas, optou-se por criar um dispositivo para abrir a trinca de fadiga, e dessa forma, conseguir aberturas intermediárias entre a trinca real e o menor entalhe de eletroerosão.

A figura 5.24 apresenta uma fotografia do corpo de prova CT já com a trinca de fadiga, recém retirado da máquina de fadiga. A trinca foi obtida em uma máquina de fadiga da fabricante Instron a partir de uma variação de carregamento de 25 kN, oscilando em uma frequência de 4 Hz. Ainda na figura 5.24, à direita, é apresentado o corpo de prova com o dispositivo para controle da abertura da trinca montado. Para controlar a abertura foi utilizado um torquímetro de estalo da fabricante Gedore conforme mencionado na seção 5.2.2.

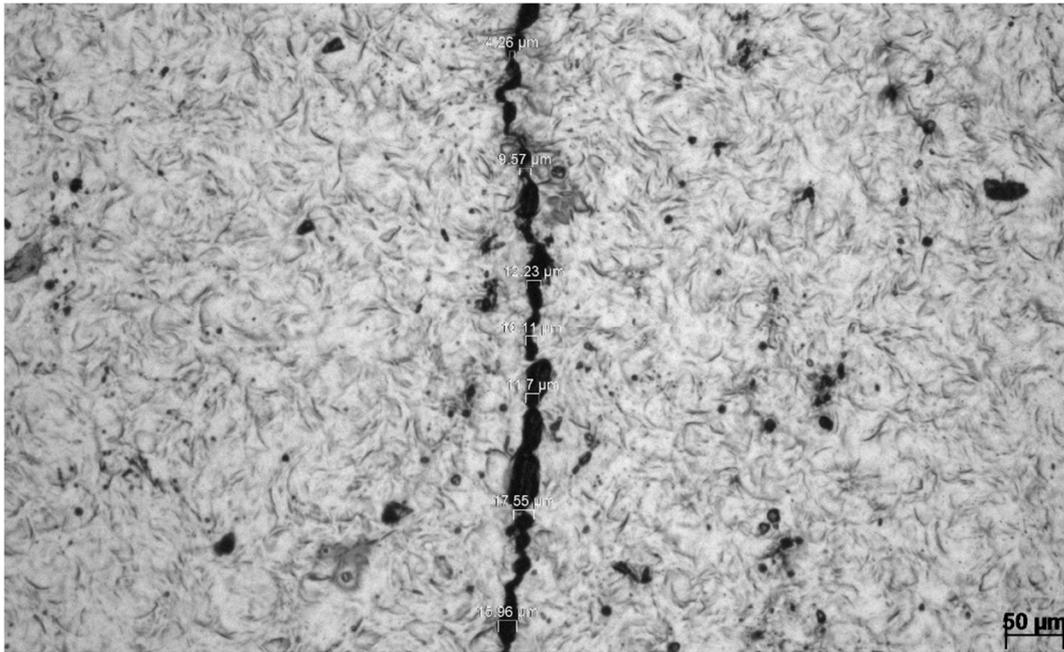


Figura 5.23: Detalhe da trinca de fadiga obtida no trabalho.

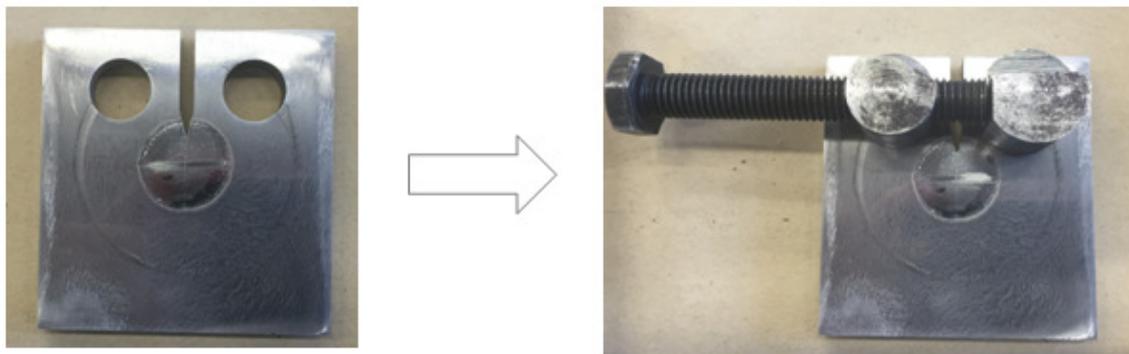


Figura 5.24: Corpo de prova com dispositivo para controle de abertura da trinca de fadiga.

Para cada torque desempenhado foi realizado a aquisição de sinais de inspeção e verificou-se no microscópio ótico a abertura correspondente. A figura 5.25a apresenta algumas imagens das trincas com diferentes aberturas enquanto a figura 5.25b apresenta a abertura de alguns dos entalhes de eletroerosão. Vale destacar que foram realizadas 10 medidas de abertura por defeito e o valor médio das medidas foi o valor utilizado para correlação com os sinais de correntes parasitas. Os valores apresentados abaixo das

imagens da figura 5.25a e b são valores aproximados das médias das aberturas obtidas. Cabe mencionar ainda que foram aplicados torques até que a trinca de fadiga alcançasse aberturas próximas dos entalhes de eletroerosão de forma que fosse possível avaliar para um mesmo valor de abertura a influencia da morfologia da trinca de fadiga e do entalhe de eletroerosão nos sinais de correntes parasitas.

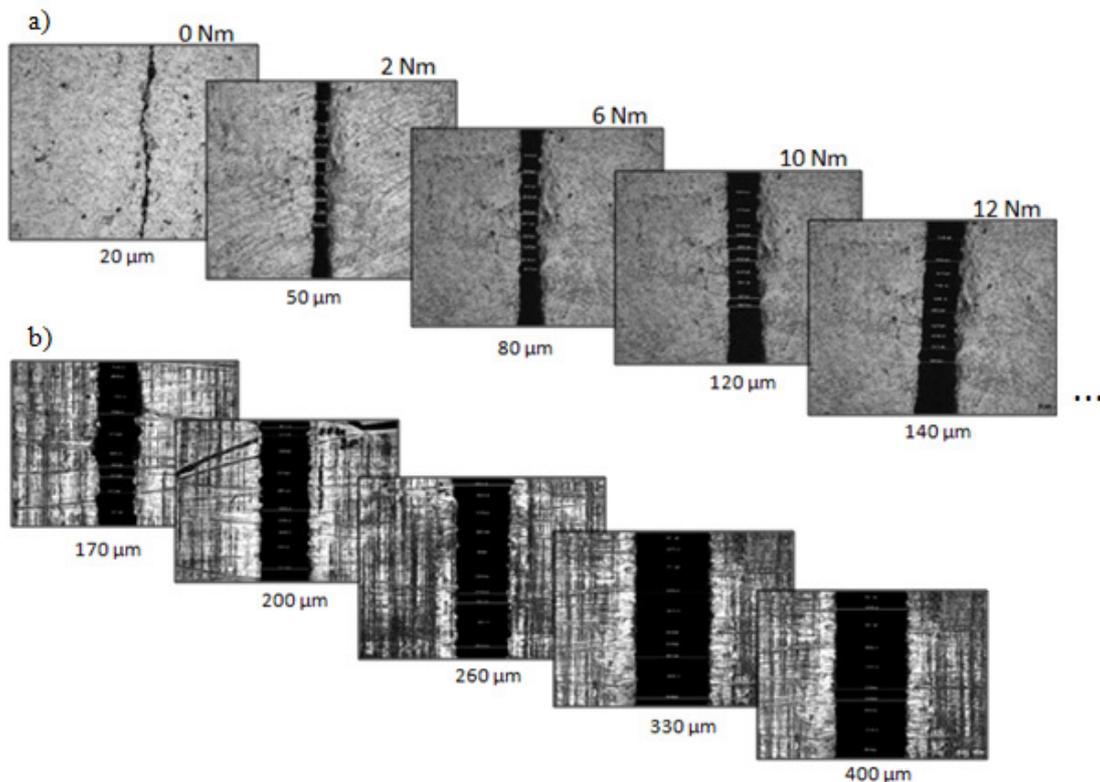


Figura 5.25: a) Variação de abertura da trinca de fadiga à medida que se aumenta o torque no parafuso do dispositivo para controle de abertura. b) Diferentes aberturas alcançadas com o processo de eletroerosão.

Para cada entalhe e para cada abertura da trinca foram realizadas cinco inspeções. A figura 5.26 apresenta a relação entre a média da amplitude do sinal em Volts em função das aberturas alcançadas. Os pontos vermelhos indicam as medidas realizadas no corpo de prova de fadiga, enquanto os pontos em azul as realizadas no

corpo de prova com entalhes de eletroerosão. A barra de erros que possui um intervalo de  $\pm 1$  desvio padrão em relação à média indica a variabilidade das medidas.

Pelos resultados encontrados é possível verificar que o parâmetro abertura tem uma grande influência nos resultados de inspeção, onde, à medida que se aumenta a abertura, maior é a amplitude do sinal de resposta do sensor. Sendo o sinal da trinca de fadiga atenuado em cerca de 2,5 dB (25%) em relação ao sinal de abertura padrão de entalhes de eletroerosão, 0,20 mm. Considerando o menor entalhe de eletroerosão (0,16 mm), a atenuação é um pouco mais branda, aproximadamente 2,1 dB (22%). O resultado encontrado mostra, portanto, a importância de se corrigir os sinais de eletroerosão para que estes sejam representativos para situação de campo, cujo objetivo é a detecção de trincas de fadiga.

Do resultado alcançado é possível identificar ainda alguns aspectos interessantes como, por exemplo, a compatibilidade de aberturas. Sinais de entalhes de eletroerosão e de trincas de fadiga com a mesma abertura apresentaram sinais de correntes parasitas bem próximos, demonstrando que a influência da morfologia da trinca pode ser negligenciada. Além disso, inicialmente, nas três primeiras medidas de abertura, a variação de amplitude é bastante abrupta e em seguida, a partir da quarta medida em diante, é assumida uma tendência praticamente linear.

Os resultados obtidos se diferenciam bastante dos alcançados por Nakagawa e Larson [31 e 32]. Os menores entalhes fabricados pelos autores apresentaram diferenças pequenas para a trinca de fadiga, na ordem de 12% da amplitude do sinal, enquanto os maiores apresentaram variações de 35%. Porém, conforme discutido no Capítulo 3, eram todos entalhes rasos, onde a profundidade e o formato do acabamento do entalhe influenciavam o sinal de inspeção. Nos resultados alcançados pelo presente trabalho, a variação de amplitude do sinal do entalhe de menor abertura para a trinca de fadiga foi da ordem de 22%, enquanto que para o entalhe de maior abertura, já 20 vezes maior que a trinca de fadiga, a variação encontrada ficou na ordem de 33% da amplitude.

O presente trabalho levou em consideração defeitos típicos de usinagem que normalmente são utilizados para representar diferentes tipos de defeitos. Sendo portanto uma abordagem mais genérica do que a apresentada por [31 e 32].

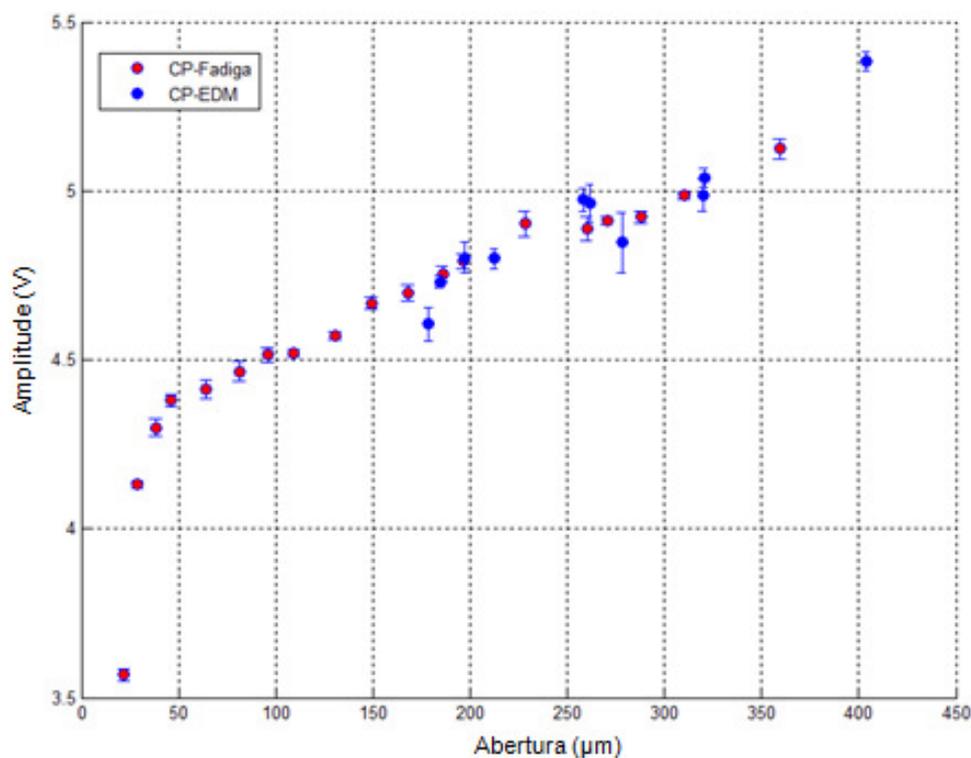


Figura 5.26: Amplitude do sinal de inspeção em função da abertura das descontinuidades.

## 5.4 Testes de velocidade de inspeção para aplicação da técnica em ferramentas de inspeção interna

Para que seja possível aplicar a técnica de correntes parasitas em ferramentas de inspeção interna é preciso avaliar a capacidade de detecção da técnica quando operando em velocidades compatíveis com as de campo. Conforme comentado no capítulo 2, o veículo transportador do sensor terá sua velocidade ditada pela velocidade do fluxo do fluido em produção, que varia em torno de 0,5 – 4 m/s.

Com o auxílio do braço robótico diferentes velocidades de inspeção foram testadas na amostra com entalhe de 1,5 mm de profundidade, onde em cada velocidade de inspeção foi desempenhada uma varredura do sensor passando pela solda em uma região afastada do entalhe e uma varredura passado sobre a região na qual o entalhe estava inserido.

A figura 5.27 apresenta o comportamento da resistência e da reatância indutiva para cada velocidade de inspeção testada. Iniciou-se os testes com uma velocidade de 0,05 m/s, baixa se tratando da aplicação em ferramentas de inspeção interna. Posteriormente, a velocidade de inspeção foi aumentada com incrementos de 0,05 m/s até se chegar a velocidade de 1,0 m/s. Conforme demonstrado nos resultados alcançados, para velocidades baixas, a detecção do defeito é bastante clara, tanto na componente resistiva, devido ao aumento na amplitude do sinal, quanto na reativa, devido à proeminente presença do pico adjacente ao sinal da solda, sinalizado na figura 5.27 com os números 1, 2 e 3. No entanto, à medida que se aumenta a velocidade, para 0,5 e 1,0 m/s, a identificação do entalhe fica mais complicada por dois motivos: Primeiro devido a menor resolução longitudinal, pois quanto maior a velocidade de inspeção menor é a quantidade de amostras ao longo da inspeção; E segundo devido ao defeito estar depois do cordão de solda de acordo com sentido de inspeção. Conforme discutido no Capítulo 4, a situação do defeito após o cordão é a mais complexa de se inspecionar, e por isso foi a condição selecionada para se trabalhar na seção de resultados. Para estas velocidades é preciso magnificar os sinais para que se perceba a presença do entalhe, conforme ilustrado na figura 5.27. Em 0,5 m/s é ainda possível perceber a presença do pico adjacente (circulo vermelho), porém ao dobrar a velocidade, o pico do defeito praticamente se mescla com o sinal da solda, onde nota-se somente uma suave protuberância devido ao entalhe, indicada pela seta em vermelho.

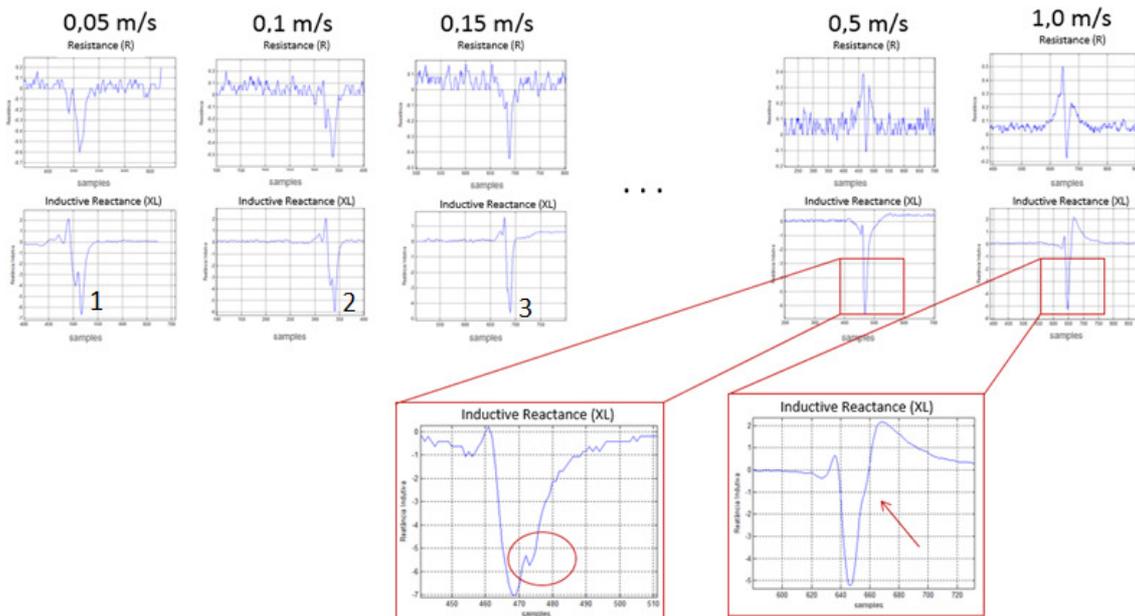


Figura 5.27: Resultado de reatância indutiva e resistência para diferentes velocidades de inspeção.

Tendo em vista os resultados de inspeção alcançados, as dificuldades associadas à detecção de defeitos em alta velocidade e as vantagens obtidas com o processo de otimização da frequência de operação da sonda apresentado na seção 5.2, decidiu-se avaliar cuidadosamente os parâmetros utilizados no processo de inspeção com o objetivo de otimizá-los de forma que seja possível aprimorar a capacidade de detecção do sensor quando operando em altas velocidades de inspeção.

#### 5.4.1 Otimização dos parâmetros de inspeção

Conforme discutido, alguns parâmetros precisam ser definidos ao se iniciar um processo inspeção por correntes parasitas. A figura 5.28 apresenta todos os parâmetros que são ajustados para uma inspeção, são eles: frequência de excitação, voltagem de alimentação, ganho, rotação dos sinais e inspeção em relação aos eixos do plano de impedância e ganho vertical.

A relevância da frequência de excitação já foi bastante discutida e inclusive foi apresentada uma rotina experimental para definição da frequência ótima de inspeção, seção 5.2.

A voltagem é um parâmetro de simples definição, pois se utiliza sempre a maior voltagem permitida pelo equipamento para configuração de sensor em operação. Quanto maior a voltagem maior a amplitude do sinal de inspeção e, conseqüentemente, a sensibilidade do ensaio. Aspectos sobre sensibilidade do ensaio em função da voltagem e corrente induzida foram discutidos no Capítulo 3.

O ganho, ou ganho global (como é muitas vezes chamado), assim como a voltagem está diretamente relacionado à amplitude do sinal de inspeção, normalmente é ajustado para se trabalhar com o valor máximo permitido sem que sature o sinal de resposta do sensor. É importante lembrar que este é um ganho digital, normalmente utilizado para facilitar a visualização do operador, portanto, é fundamental que antes de aplicar valores de ganho se defina a voltagem de alimentação do sensor.

O parâmetro de rotação, como o próprio nome sugere, rotaciona os sinais de inspeção em relação ao eixo das abscissas do plano de impedância. Ao selecionar uma rotação de  $10^\circ$ , por exemplo, a fase do sinal de inspeção será deslocada em  $10^\circ$  de sua posição original em relação ao eixo da resistência, seguindo o padrão do círculo trigonométrico. É comum em procedimentos de inspeção, que se solicite ao operador durante o processo de calibração que seja ajustada a rotação do ensaio de forma que o sinal de *lift-off* do sensor fique à  $90^\circ$  do sinal do defeito inserido no corpo de prova de calibração [47]. Esse ajuste é feito a partir de variações no parâmetro de rotação.

O ganho vertical se diferencia do ganho global devido a constante de ganho ser amplificada somente na componente reativa.

Por fim, visando aprimorar os resultados de inspeção alcançados até então, foram avaliados os parâmetros que poderiam influenciar a capacidade de detecção. A figura 5.28, apresenta todos os parâmetros que devem ser definidos durante o processo de inspeção e o quadro pontilhado na figura, destaca os parâmetros que foram julgados como sendo os principais parâmetros que podem influenciar no processo de detecção da

trinca e que ainda poderiam ser aprimorados. São eles: rotação e ganho vertical, e terão uma definição mais detalhada no trabalho.

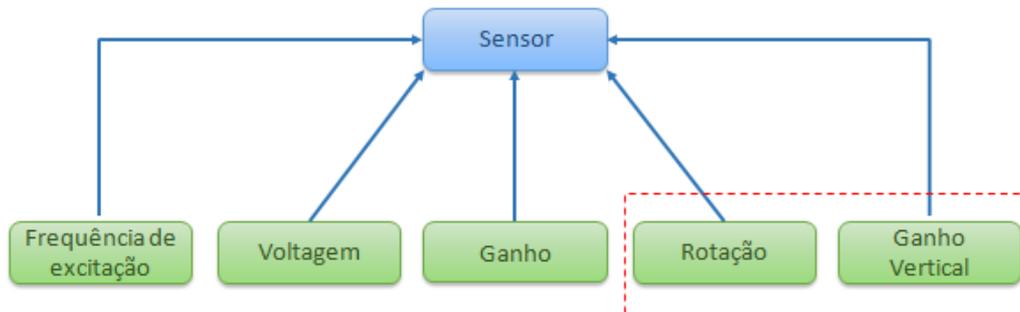


Figura 5.28: Parâmetros que devem ser definidos para se iniciar uma inspeção por correntes parasitas. Em destaque os parâmetros que serão estudados para aprimoramento da capacidade de detecção da trinca de fadiga.

Os valores de rotação e ganho vertical utilizados nos resultados obtidos até então no presente trabalho, foram de  $152^\circ$  e 15 dB, respectivamente, e foram definidos durante o processo de calibração. No entanto, durante os diversos testes de varredura realizados no trabalho foi observado que uma rotação ou um ganho vertical diferente dos que haviam sido utilizados nas inspeções até então poderiam influenciar a capacidade de detecção do defeito. Com base nisso, decidiu-se realizar um estudo sobre quais os valores de tais parâmetros que poderiam aprimorar a capacidade de detecção.

Tomando sempre como base a amplitude do vetor de impedância ou módulo de  $Z ( |Z| )$ , definido pela equação 5.3 e demonstrado pela figura 5.29, verificou-se como a variação dos parâmetros de rotação e ganho vertical influenciam esse valor de amplitude.

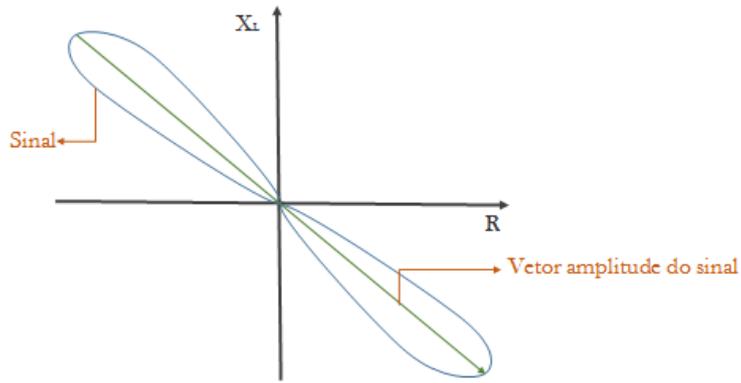


Figura 5.29: Vetor de amplitude do sinal ou  $|Z|$ .

O ganho vertical se diferencia do ganho global pelo simples fato de ser aplicado apenas na componente vertical do plano de impedância, o que altera a forma de curva ampliando a diferença entre a resistência e a reatância indutiva. A equação 5.4 apresenta como o módulo da impedância é alterado ao aplicar um ganho vertical, onde uma constante de ganho  $G$  multiplica a componente reativa dando origem ao módulo  $|Z'_{Gv}|$ , sendo  $|Z'_{Gv}| \neq |Z|$ . A figura 5.30 ilustra a variação do módulo do vetor a partir de um determinado ganho vertical. A componente resistiva se mantém constante, porém o módulo e a fase do vetor são modificados ao aplicar o ganho no eixo da reatância indutiva.

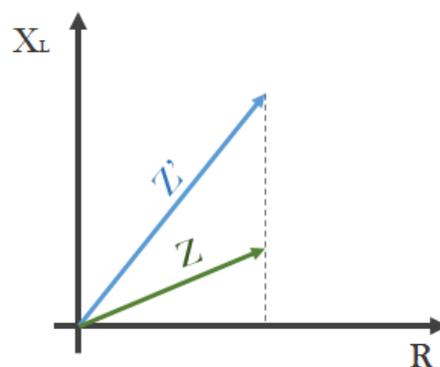


Figura 5.30: Influência do ganho vertical na amplitude do vetor de impedância.

Considerando o parâmetro de rotação. Ao modificar os valores de rotação, o módulo do vetor de impedância se mantém constante  $|Z| = |Z'_{rot}|$ , porém o novo vetor se rotaciona para o novo ângulo definido, conforme ilustrado na figura 5.31. Sendo  $\beta$  o ângulo do vetor original em relação ao eixo horizontal,  $\theta$  o ângulo do vetor rotacionado em relação ao eixo horizontal e  $\alpha$  a variação de ângulo entre os dois vetores, onde,  $\alpha = \beta + \theta$ . Para se rotacionar o vetor original é necessário definir os novos valores de resistência e reatância indutiva,  $R_{rot}$  e  $Xl_{rot}$ , de acordo com o ângulo definido pelo operador. Para tal é preciso multiplicar os valores iniciais de  $R$  e  $Xl$  pela matriz de rotação, a qual por definição é uma matriz quadrada que quando aplicada sobre a representação matemática de vetor, tem o efeito de mudar a direção do vetor, mas não sua magnitude [48]. A equação 5.6 apresenta como são obtidos os valores  $R_{rot}$  e  $Xl_{rot}$  a partir da matriz de rotação 2D. A matriz de rotação pode ser facilmente demonstrada a partir dos ângulos  $\theta$ ,  $\beta$  e  $\alpha$ , porém, por fugir do escopo do presente trabalho, sua demonstração não será contemplada.

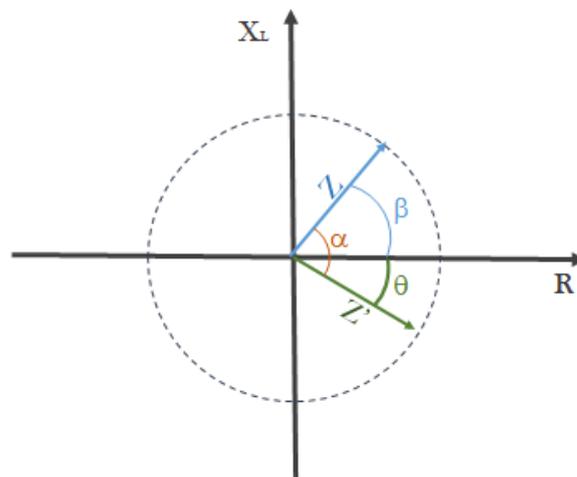


Figura 5.31: Exemplificação da rotação de um vetor no plano de impedância complexa.

$$|Z| = \sqrt{R^2 + Xl^2} \quad 5.3$$

$$|Z'_{Gv}| = \sqrt{R'^2 + G.Xl'^2} \quad 5.4$$

$$|Z| = |Z'_{rot}| \neq |Z'_{Gv}| \quad 5.5$$

$$\begin{bmatrix} R_{rot} \\ Xl_{rot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \text{sen}(\alpha) \\ -\text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ Xl \end{bmatrix} \quad 5.6$$

Uma vez compreendido a influência dos parâmetros de rotação e ganho vertical no sinal de inspeção, passou a se perguntar se teria alguma combinação de valores de tais parâmetros que facilitaria a detecção dos entalhes adjacentes ao cordão de solda. Para tal foram realizadas duas varreduras, uma sobre o cordão de solda sem defeito (fora do entalhe) e uma sobre o cordão com o entalhe (entalhe). Para o par de sinais, entalhe e fora do entalhe, foram variados os parâmetros de rotação e ganho vertical e foi comparado o módulo do vetor de amplitude máxima entre os sinais. Vale destacar que, como são parâmetros de pós-processamento, estes podem ser facilmente representados via Matlab ou demais *software* de manipulação de dados.

A figura 5.32 exemplifica a comparação entre o sinal de varredura da solda passando pelo cordão de solda e pelo entalhe, e o sinal passando somente pelo cordão de solda, fora da região do entalhe. A curva em vermelho é referente ao sinal fora da região do entalhe, enquanto a curva em azul do sinal passando pelo entalhe no sentido solda-entalhe (S-E). A seta em azul escuro indica o maior vetor de amplitude para cada um dos sinais. Os sinais foram obtidos com os parâmetros de rotação e ganho vertical aleatórios, sendo a figura simplesmente para ilustrar a grandeza a ser medida (módulo

do vetor de amplitude máxima) e facilitar o entendimento do algoritmo de otimização que foi desenvolvido.

O objetivo do algoritmo é avaliar a interação entre os parâmetros e buscar a combinação que melhor diferencia os sinais. Para tal, foram feitas dentro de uma rotina em Matlab diversas combinações dos sinais com o ganho vertical variando de 0-20 dB e a rotação entre 0-180°. Para cada combinação buscou-se os vetores de amplitude máxima e os valores de amplitude foram correlacionados entre si a partir da equação 5.7. A equação 5.7 tem como principal função maximizar a diferença entre o sinal do entalhe e o sinal da solda. Sendo, quanto maior o valor do  $\left| \frac{\Delta amplitude}{Amplitude solda} \right|$ , que foi chamado de delta de detecção, melhor a diferenciação entre o sinal do entalhe e o sinal da solda.

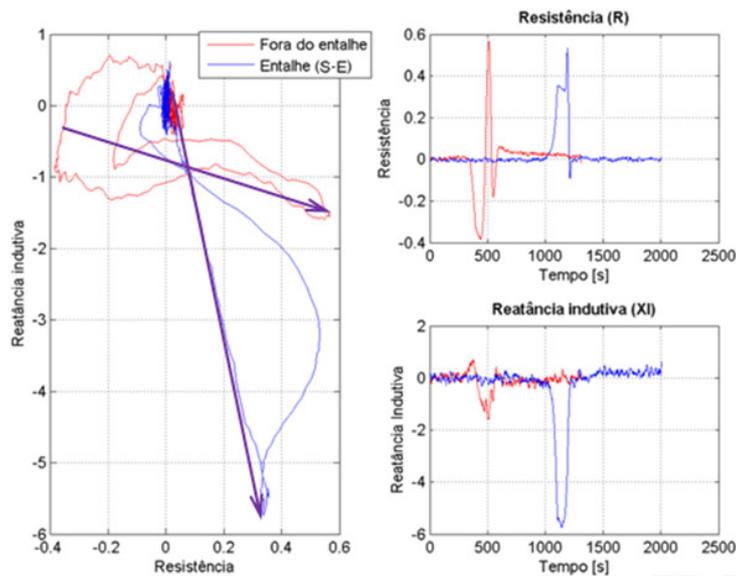


Figura 5.32: Comparação entre o sinal de varredura da solda em vermelho (fora do entalhe) com o sinal do entalhe em azul. A seta em azul escuro indica o vetor máximo de impedância em cada um dos sinais.

$$\left| \frac{\Delta amplitude}{Amplitude solda} \right| = \left| \frac{AmpEntalhe (S - E) - AmpSoldaForaEntalhe}{Amplitude Solda Fora Entalhe} \right| \times 100 \quad 5.7$$

Para cada combinação de valores de ganho vertical e rotação foi determinado o valor máximo do vetor em cada sinal e calculado o valor do delta de detecção associado. Foi traçado então uma superfície de resposta que relaciona o delta de detecção para cada combinação de rotação e do ganho vertical aplicado, figura 5.33. Conforme demonstrado na superfície de resposta, para uma determinada combinação de parâmetros é possível alcançar uma melhor diferenciação do sinal do entalhe para o sinal da solda, aprimorando assim a detecção do entalhe. Para valores de rotação por volta de  $60^\circ$  combinados com ganho vertical acima de 10 dB é alcançada uma melhor resposta de detecção do entalhe.

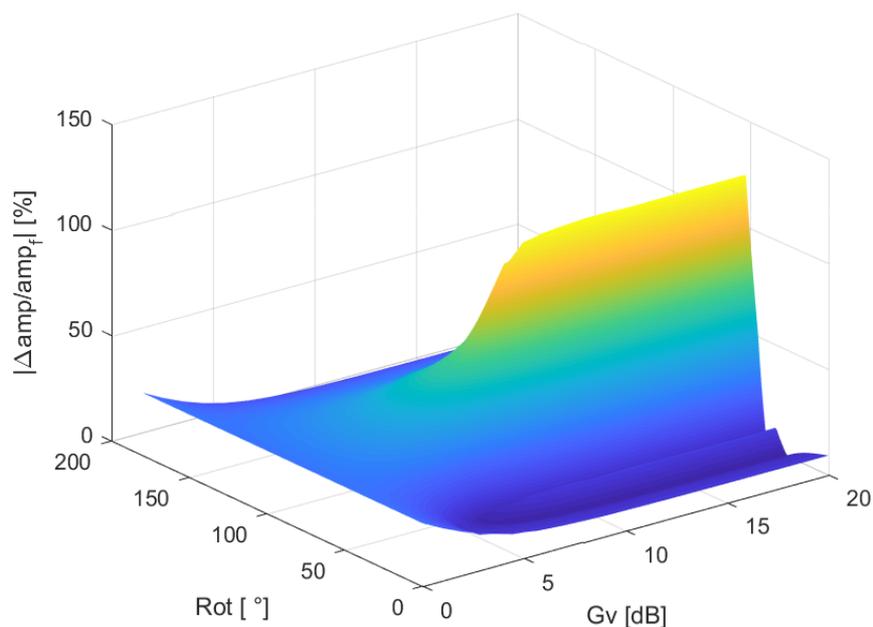


Figura 5.33: Superfície de resposta (delta de detecção) para diferentes combinações de rotação e ganho vertical.

Por fim, para verificar a influência da otimização dos parâmetros foi realizado uma varredura completa em toda amostra cladeada com entalhe de 1,5 mm de profundidade. A figura 5.34a apresenta o *C-Scan* com os parâmetros não otimizados, onde é possível identificar a presença da trinca ( $x = 40$  mm,  $y = 15$  mm) conforme apresentado na seção 5.1. Enquanto a figura 5.34b apresenta o *C-Scan* obtido com os

parâmetros otimizados obtidos a partir da superfície de resposta apresentada na figura 5.33.

É importante frisar ainda que os dados de inspeção são os mesmos. Modificou-se apenas a forma de visualização a partir de rotinas de pós-processamento.

Conforme percebido pela figura 5.34, a otimização dos parâmetros resultou em uma identificação mais clara do entalhe. Vale observar que apesar do sinal de inspeção de forma geral ter diminuído de amplitude (barra de cores ao lado das figuras) com os parâmetros otimizados, a relação entre a amplitude dos sinais referentes ao entalhe e a amplitude dos sinais da solda aumentou consideravelmente. No caso dos parâmetros não otimizados, é possível encontrar amplitudes de sinais no cordão de solda próximas às amplitudes do entalhe.

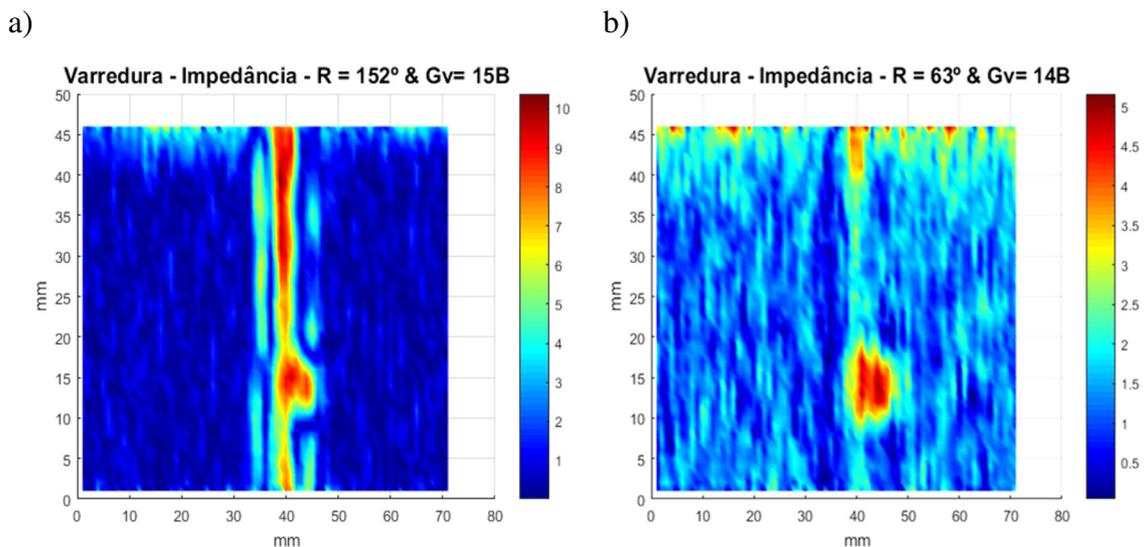


Figura 5.34: Resultado da otimização de parâmetros de rotação e ganho vertical. No *C-Scan* (a) foram utilizados os parâmetros inicialmente definidos para inspeção do corpo de prova cladeado, enquanto no (b) utilizou-se os parâmetros otimizados para diferenciar o entalhe do cordão de solda.

A otimização dos parâmetros realizada teve como objetivo encontrar os melhores parâmetros de inspeção de forma a facilitar a identificação do entalhe junto ao

cordão de solda. Para que mesmo em condições adversas, como em alta velocidade e *lift-off* seja possível identificar defeitos na raiz de juntas soldadas. Isto é, se existe uma possibilidade de se detectar defeitos em condições de operação de campo para o problema em estudo, a maneira de detectá-los é utilizando a frequência ótima de inspeção (definida na seção 5.2) e os parâmetros de rotação e ganho vertical otimizados, aqui apresentados.

Cabe destacar que o algoritmo desenvolvido foi consequência da dificuldade encontrada no problema em questão, porém pode ser aplicado em diferentes situações onde se deseja aprimorar a identificação de trincas a partir de sinais de correntes parasitas. Na literatura associada não foram encontrados resultados semelhantes, estando os principais trabalhos que tratam da detecção de trincas em juntas soldadas a partir do ensaio de correntes parasitas destacados no Capítulo 3.

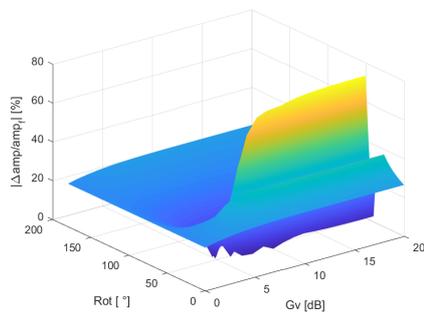
#### **5.4.2 Dimensionamento da profundidade dos entalhes**

Conforme apresentado na figura 5.4, foram fabricados quatro corpos de prova com entalhes na mesma posição, com mesmo comprimento e abertura, porém com diferentes profundidades. Com o objetivo de verificar a capacidade de dimensionamento da técnica foi avaliado para cada corpo de prova a superfície de resposta do delta de detecção conforme esclarecido na figura 5.33. Avaliar a capacidade de dimensionamento através da superfície de resposta é pertinente, pois caso exista diferença de amplitude entre os sinais referentes à profundidade dos defeitos, o ponto de máximo da superfície será proporcional a tal diferença, assumindo, claro, que o sinal da solda sem o entalhe é praticamente o mesmo.

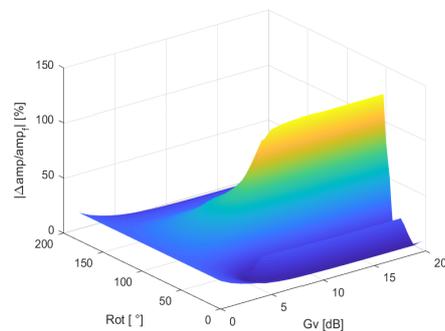
A figura 5.35a, b, c e d apresenta a superfície de resposta a partir da combinação dos parâmetros para cada um dos corpos de prova. Sendo a figura 5.35a correspondente ao corpo de prova com entalhe de 1,0 mm de profundidade, a figura 5.35b ao entalhe com profundidade de 1,5 mm (mesmo gráfico da figura 5.33), e a 'c' e a 'd', referente aos corpos de prova com entalhes de 2,0 e 3,0 mm, respectivamente. A partir da análise do formato das superfícies encontradas é possível extrair algumas conclusões relevantes. Quanto mais raso o entalhe, menor é o pico alcançado na combinação ótima

dos parâmetros, o que é coerente, uma vez que o sinal de menor profundidade apresenta a menor amplitude e conseqüentemente o menor delta de detecção. Além disso, é possível observar nas curvas que quanto mais raso o entalhe, menor e menos estável é a região de resposta ótima. Este fato é também coerente, dado que um defeito que apresenta um sinal de baixa amplitude exige uma maior amplificação, no caso ganho vertical, e um casamento mais estreito entre fase dos sinais, determinada pela variação do parâmetro de rotação.

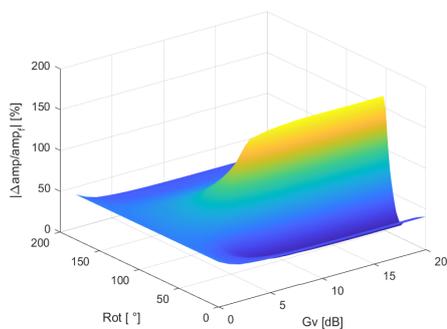
a)



b)



c)



d)

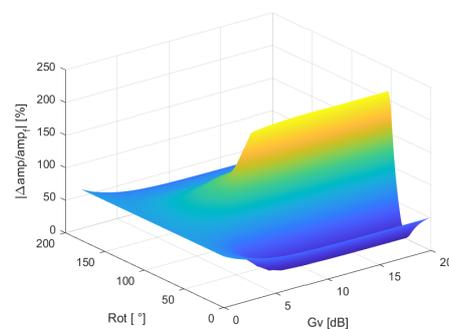


Figura 5.35: Superfície de resposta de otimização dos parâmetros para os copos de prova com diferentes profundidades. Sendo: a) corpo de prova com entalhe de 1,0 mm de profundidade, b) corpo de prova com entalhe de 1,5 mm de profundidade, c) corpo de prova com entalhe de 2,0 mm de profundidade e d) corpo de prova com entalhe de 3,0 mm de profundidade.

A figura 5.36 apresenta um gráfico que correlaciona amplitude máxima da superfície de resposta ou valor máximo do delta de detecção, com a profundidade do entalhe. Conforme ilustrado no gráfico, um polinômio do segundo grau ajustou os resultados de maneira bastante razoável.

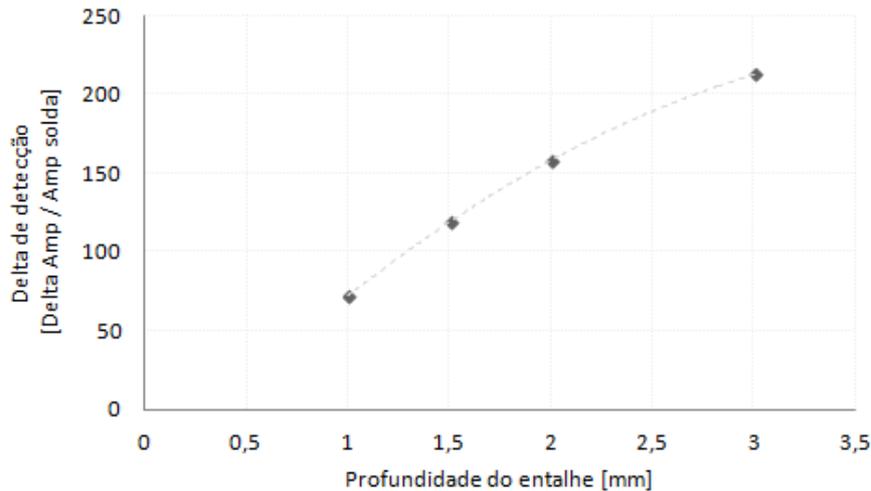


Figura 5.36: Dimensionamento dos entalhes com o valor máximo do delta de detecção em função a profundidade dos entalhes.

## 5.5 Testes com *array* de sensores com configuração relevante para inspeção de campo

Testes com configuração de inspeção relevante consiste em avaliar velocidades dentro do intervalo de operação das ferramentas de inspeção interna e com a presença *lift-off*. O *lift-off*, conforme discutido no Capítulo 4 é um parâmetro importante, pois operar com o sensor afastado da parede de inspeção diminui o processo de abrasão do sensor e conseqüentemente seu desgaste.

### 5.5.1 Construção dos sensores ortogonais para testes com *array*

Para os testes com *array* foram construídas cinco sondas ortogonais, conforme apresentado pela figura 5.37. As sondas foram construídas com o auxílio de uma bobinadeira CNC da fabricante Digmotor, conforme mostrado na figura 5.38. Os principais desafios associados à construção da sonda são o fato das camadas das bobinas ortogonais estarem sobrepostas, figura 5.39, e o pequeno diâmetro do fio de cobre esmaltado, o qual precisa estar suficientemente tensionado para garantir o perfeito alinhamento entre as espiras, porém de forma que resista às rampas aceleração do embobinamento. O ajuste da tensão no fio é uma das variáveis fundamentais para que se tenha uma bobina com elevado grau de acabamento.

A tabela 5.1 apresenta os parâmetros de construção da sonda, como diâmetro do fio, número de voltas, etc. A tabela 5.2 por sua vez, apresenta a média de três medidas de impedância das bobinas do sensor ortogonal no ar em 500 kHz, e as respectivas indutâncias em  $\mu\text{H}$ , onde nota-se uma proximidade entre os valores de cada uma das bobinas fabricadas, o que indica uma alta precisão no processo de fabricação.

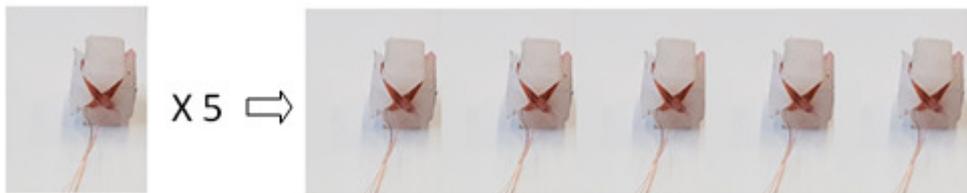


Figura 5.37: Bobinas fabricadas para o teste com *array* de sensores.



Figura 5.38: Bobinadeira CNC para fabricação das sondas.

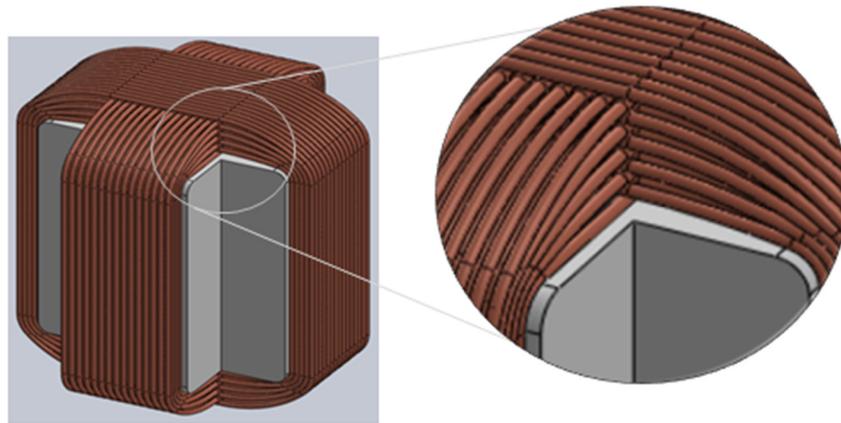


Figura 5.39: Esquemático das bobinas da sonda ortogonal, onde em destaque é apresentado uma das principais dificuldades encontradas no processo de fabricação, sobreposição das camadas das bobinas.

Bobina	Diâmetro Fio	Número de espiras por camada	Número de camadas	Total de voltas
bobina A	0,08 mm	15	5	75
bobina B	0,08 mm	15	5	75

Tabela 5.1: Parâmetros de construção das bobinas.

Sonda	Bobina	Z [ohm]	L [ $\mu$ H]
1	A	114,5	36,4
	B	115,1	36,6
2	A	117,6	36,0
	B	116,8	37,1
3	A	110,9	35,2
	B	113,8	36,2
4	A	107,0	34,0
	B	108,7	34,5
5	A	114,6	36,5
	B	115,3	36,7

Tabela 5.2: Medidas de impedância e indutância das bobinas fabricadas.

### 5.5.2 Testes com *array* de sensores com velocidades relevantes e *lift-off*

Visando a aplicação em campo, foi testado um *array* de sensores para inspeção do corpo de prova cladeado. Os testes foram realizados em chapas, assim como os demais anteriores, mas com a diferença de que os 5 sensores ortogonais fabricados foram espaçados lateralmente e percorreram a amostra simultaneamente, conforme ilustrado na figura 5.40, onde S1, S2, S3, S4 e S5, correspondem aos sensores 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente

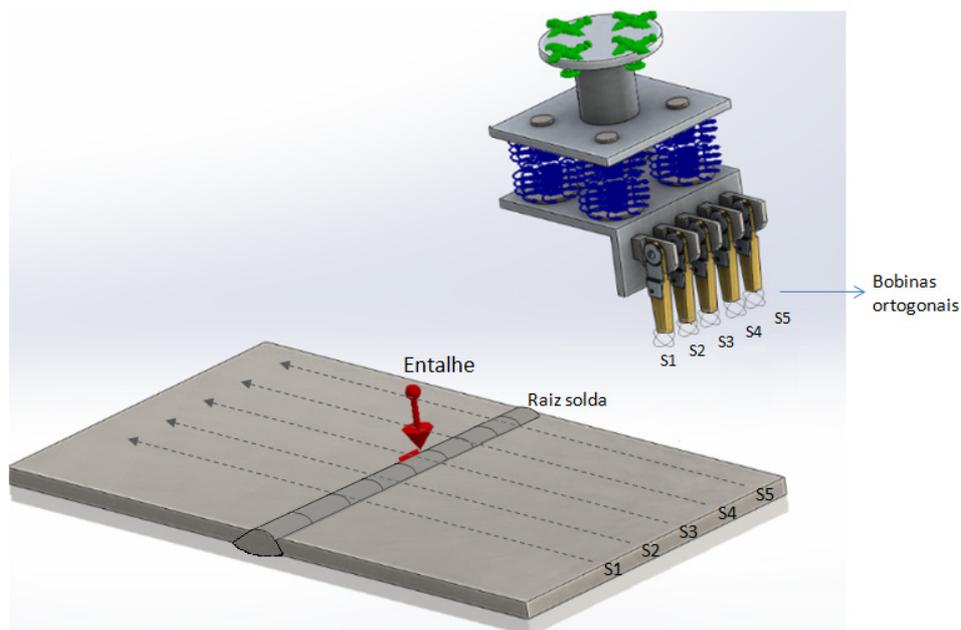


Figura 5.40: Ilustração da inspeção com *array* de sensores.

Apesar dos testes terem sido realizados em chapas, estes foram considerados representativos para situação de inspeção de dutos, pois como o sensor percorre uma seção estreita da circunferência, esta pode ser aproximada para um plano perpendicular ao sensor. Além disso, optou-se por se trabalhar com chapas devido à facilidade de manuseio do braço robótico utilizado para os testes de velocidade e do arranjo mecânico para suporte dos sensores.

A figura 5.41 apresenta a amostra testada com as setas em azul indicando o percurso dos sensores e ao lado a representação de uma inspeção circunferencial com os cinco sensores fabricados, simulando uma inspeção em um duto. Destaca-se que somente o sensor 3 (S3) passou pelo entalhe.

Foram realizados testes com diferentes velocidades de inspeção combinadas com variações de *lift-off* seguindo a matriz de testes apresentada no Capítulo 4, figura 4.8. Onde se variou o *lift-off* de 0,0 à 1,0 mm com intervalo de 0,5 mm combinados com velocidades de 0,2, 0,5 e 1,0 m/s.

É oportuno salientar que para os testes com *array* de sensores foram utilizados todos os parâmetros de inspeção otimizados conforme descrito no trabalho, como frequência, ganho vertical e rotação.

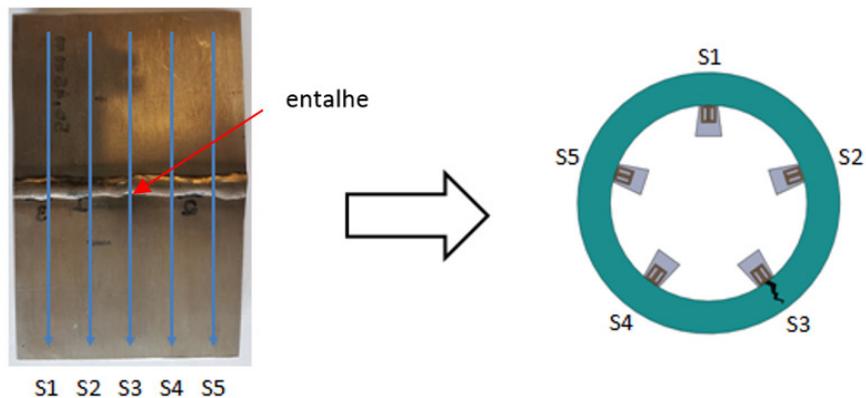


Figura 5.41: (Esquerda) Chapa cladeada utilizada nos testes com *array* de sensores; (Direita) A representação da inspeção circunferencial.

As figuras 5.42 - 5.48 apresentam os resultados de inspeção com a matriz de sensores em duas formas de visualização. Na imagem à esquerda das figuras, é apresentado o modo *C-Scan* na sua visualização padrão e, à direita, uma vista isométrica da superfície de resposta para facilitar a visualização da amplitude do sinal de inspeção do sensor 3, o qual durante o percurso passa sobre o entalhe.

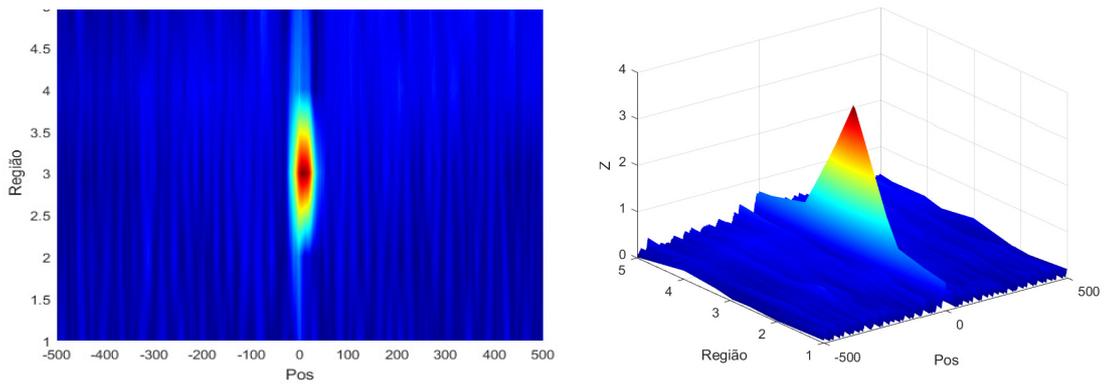


Figura 5.42: Velocidade de inspeção igual a 0,2 m/s com *lift-off* de 0,0 mm.

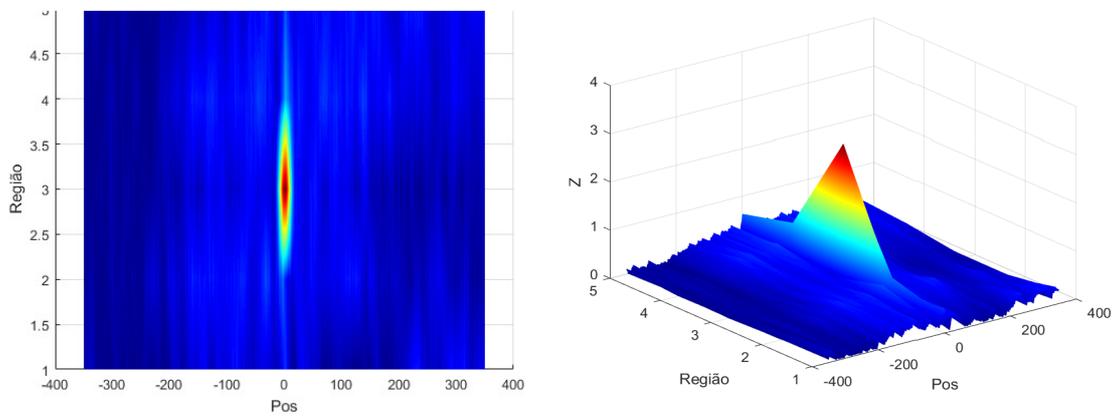


Figura 5.43: Velocidade de inspeção igual a 0,5 m/s com *lift-off* de 0,0 mm.

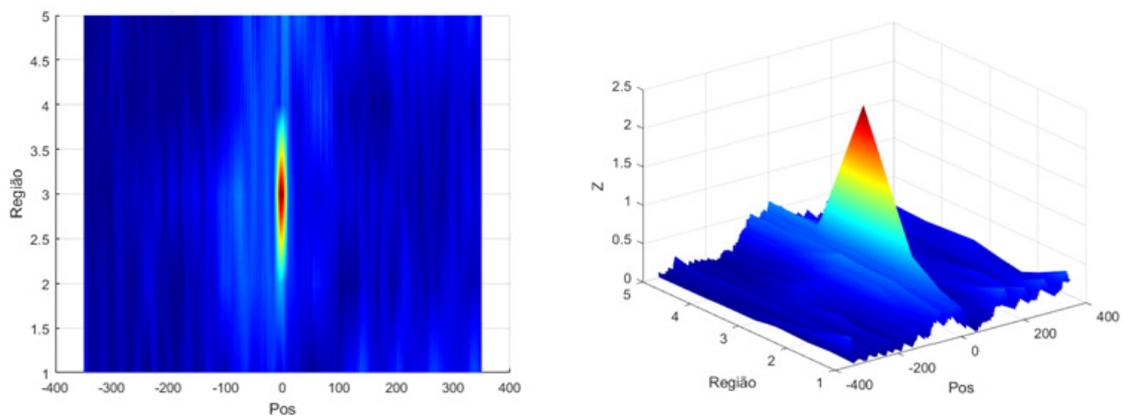


Figura 5.44: Velocidade de inspeção igual a 1,0 m/s com *lift-off* de 0,0 mm.

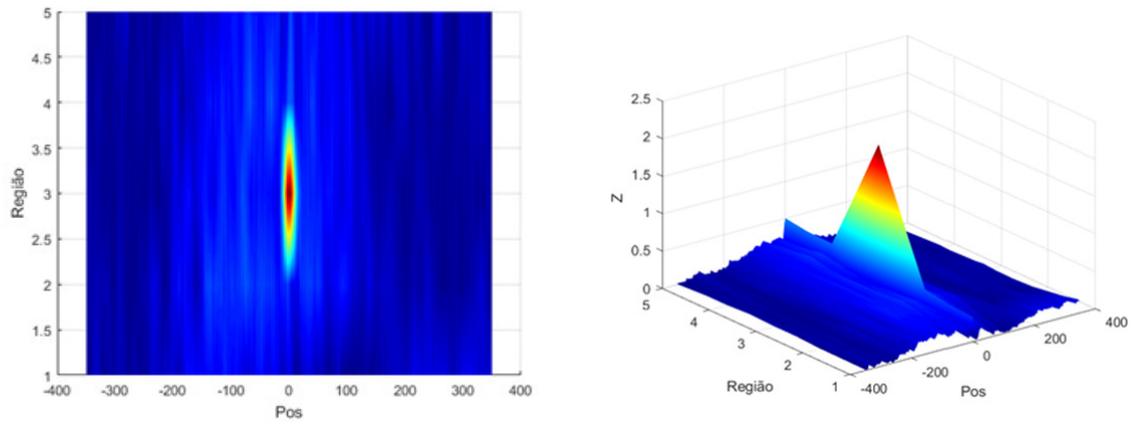


Figura 5.45: Velocidade de inspeção igual a 0,5 m/s com *lift-off* de 0,5 mm.

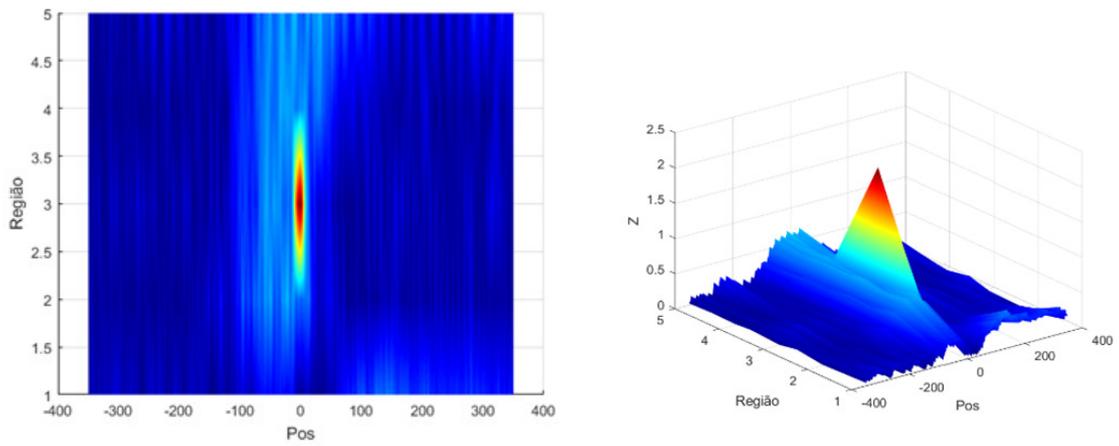


Figura 5.46: Velocidade de inspeção igual a 1,0 m/s com *lift-off* de 0,5 mm.

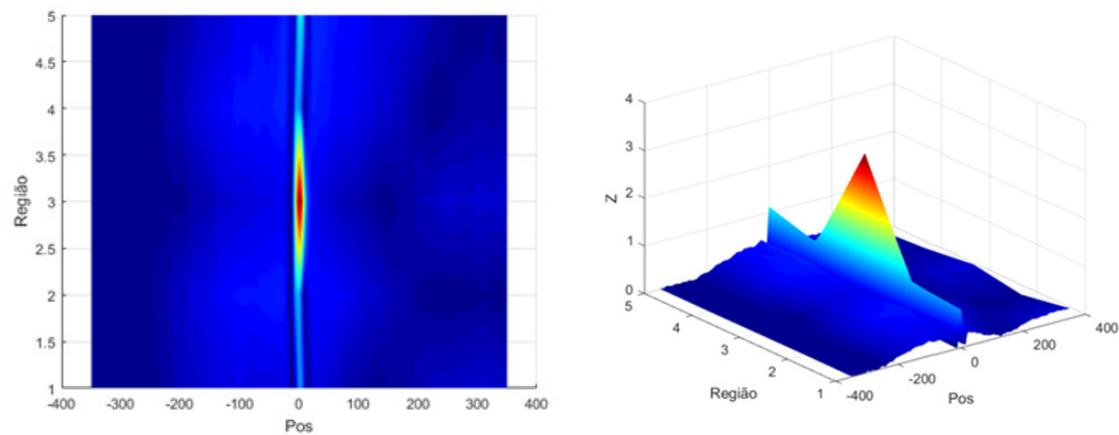


Figura 5.47: Velocidade de inspeção igual a 0,5 m/s com *lift-off* de 1,0 mm.

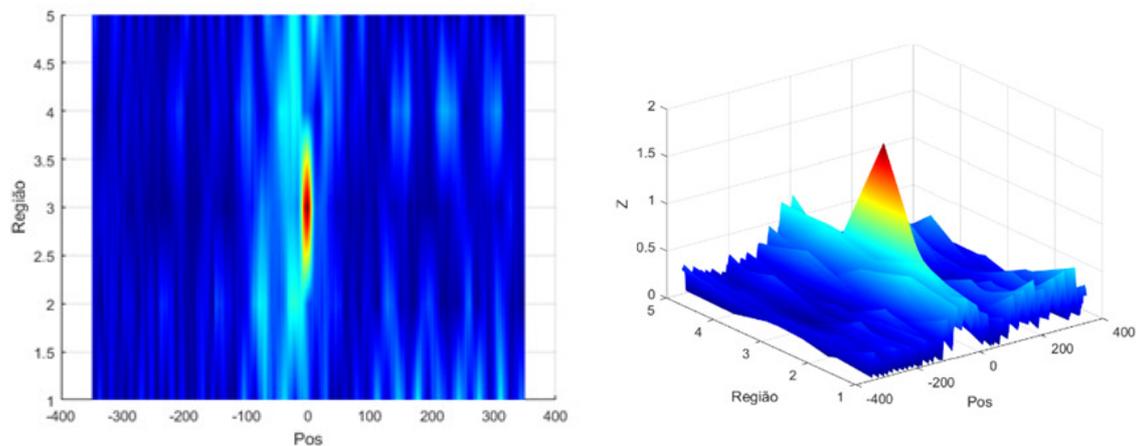


Figura 5.48: Velocidade de inspeção igual a 1,0 m/s com *lift-off* de 1,0 mm.

Alguns aspectos merecem ser destacados a partir dos resultados encontrados. Dentre estes, nota-se que o entalhe é identificado em todas as situações testadas, porém, conforme esperado, à medida que se aumenta a velocidade e o *lift-off* a amplitude do sinal do entalhe decai. Isso se deve aos seguintes fatores: (1) maior afastamento do sensor para o corpo de prova sob inspeção, o qual resulta em uma menor transmissão de energia de sinal; (2) menor quantidade de dados medidos sobre o defeito quando se aumenta a velocidade e; (3) o defeito estar após a raiz da solda, o que faz com que ao aumentar a velocidade o ponto de aterrissagem do sensor (discutido no Capítulo 4 seção 4.1.1) dificulte a identificação do entalhe.

A partir dos resultados encontrados é possível vislumbrar a aplicação da técnica de correntes parasitas para inspeção interna de dutos cladeados em operação. A otimização dos parâmetros facilitou a identificação do entalhe em situações de alta velocidade e *lift-off*. A figura 5.49 ilustra a influência dos parâmetros otimizados, onde é realizado uma comparação entre os resultados de 1.0 m/s com afastamento de 1,0 mm, sendo a imagem da esquerda correspondente ao resultado alcançado com os parâmetros otimizados, enquanto a da direita ao resultado com os parâmetros utilizados antes do algoritmo de otimização.

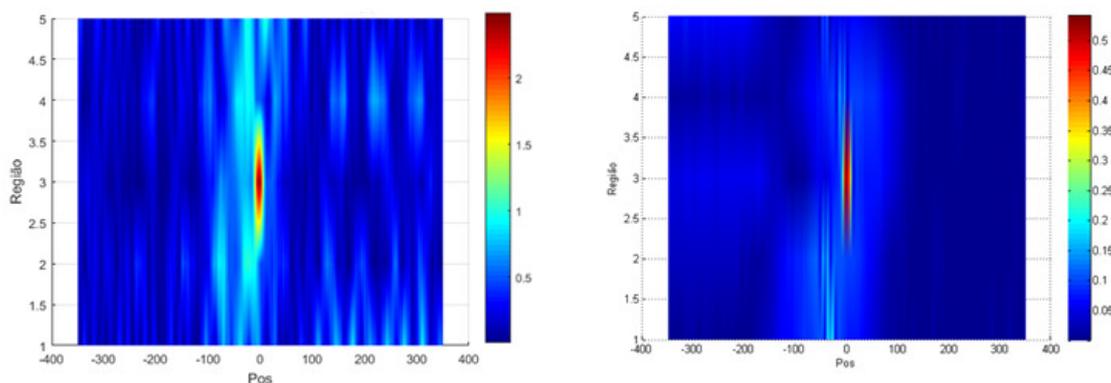


Figura 5.49: Ilustração da influência da utilização dos parâmetros otimizados. Imagem à esquerda apresenta o resultado para 1,0 m/s e *lift-off* de 1,0 mm fazendo uso dos parâmetros ótimos; Imagem à direita apresenta o resultado para mesma situação com os parâmetros não otimizados.

Através da análise dos resultados apresentados nota-se que a quantidade de sensores utilizados não conferiu uma resolução adequada. Somente um sensor passou pelo defeito e, por conta disso, a interpolação dos valores entre os sensores 2-3 e 3-4 ficou muito abrupta, causando a sensação que o defeito possui um formato triangular, o que não é verdadeiro. Para alcançar um mapeamento mais representativo do corpo de prova foram realizados testes com uma maior resolução, isto é, com uma maior quantidade de sensores e um menor espaçamento lateral entre eles. Foram testadas as mesmas velocidades acima, porém somente para situação sem *lift-off*. A figura 5.50 ilustra a situação de maior resolução de inspeção no corpo de prova cladeado em uma imagem similar à discutida anteriormente na figura 5.41.

As figuras 5.51 - 5.53 apresentam os resultados alcançados com a melhor resolução de inspeção. Além da morfologia mais fiel do defeito e da raiz solda, e da queda da amplitude devido ao aumento da velocidade, é interessante observar as perdas de informações devido ao aumento da velocidade, como por exemplo, a largura da raiz da solda bem definida à 0,2 m/s que praticamente desaparece no teste à 1,0 m/s.

A figura 5.54a, b e c, apresenta uma visualização diferente dos mesmos resultados das figuras 5.51 - 5.53, onde é possível notar com maior clareza a influência da velocidade de inspeção no ensaio.

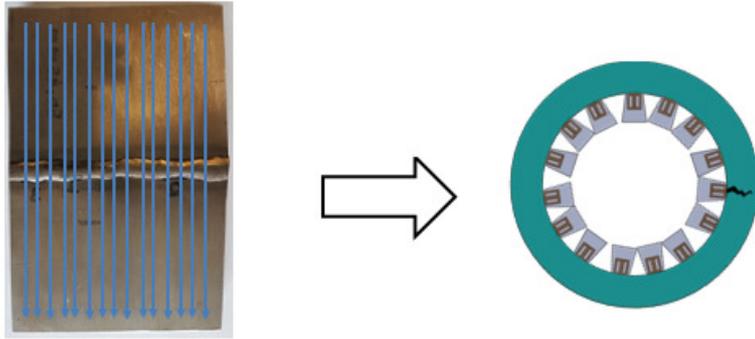


Figura 5.50: Representação da inspeção com alta resolução.

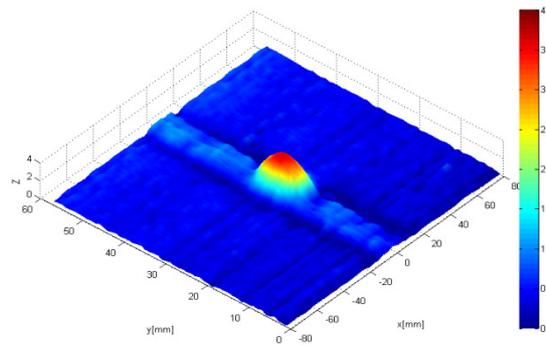


Figura 5.51: Velocidade de inspeção de 0,2 m/s.

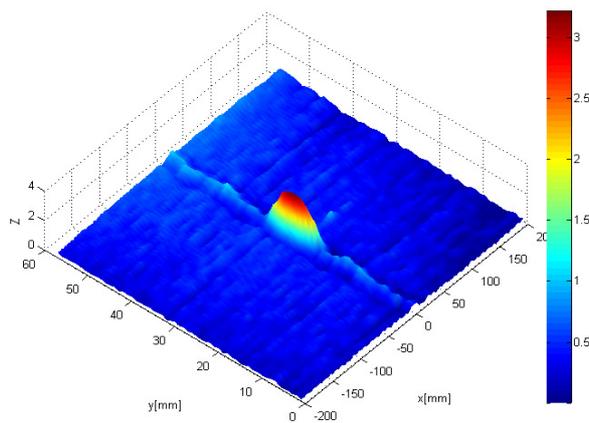


Figura 5.52: Velocidade de inspeção de 0,5 m/s.

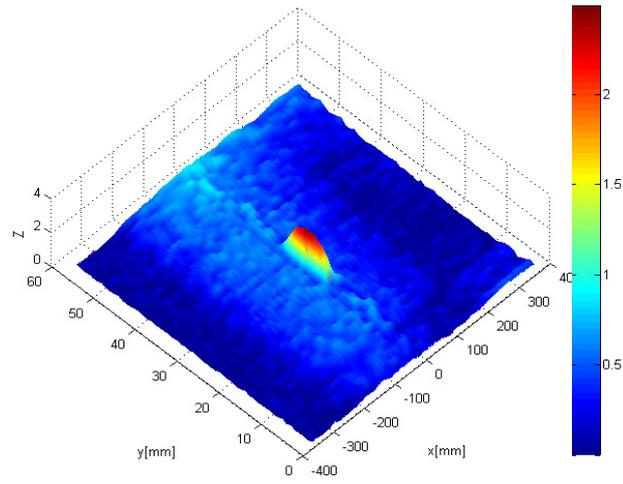


Figura 5.53: Velocidade de inspeção de 1,0 m/s.

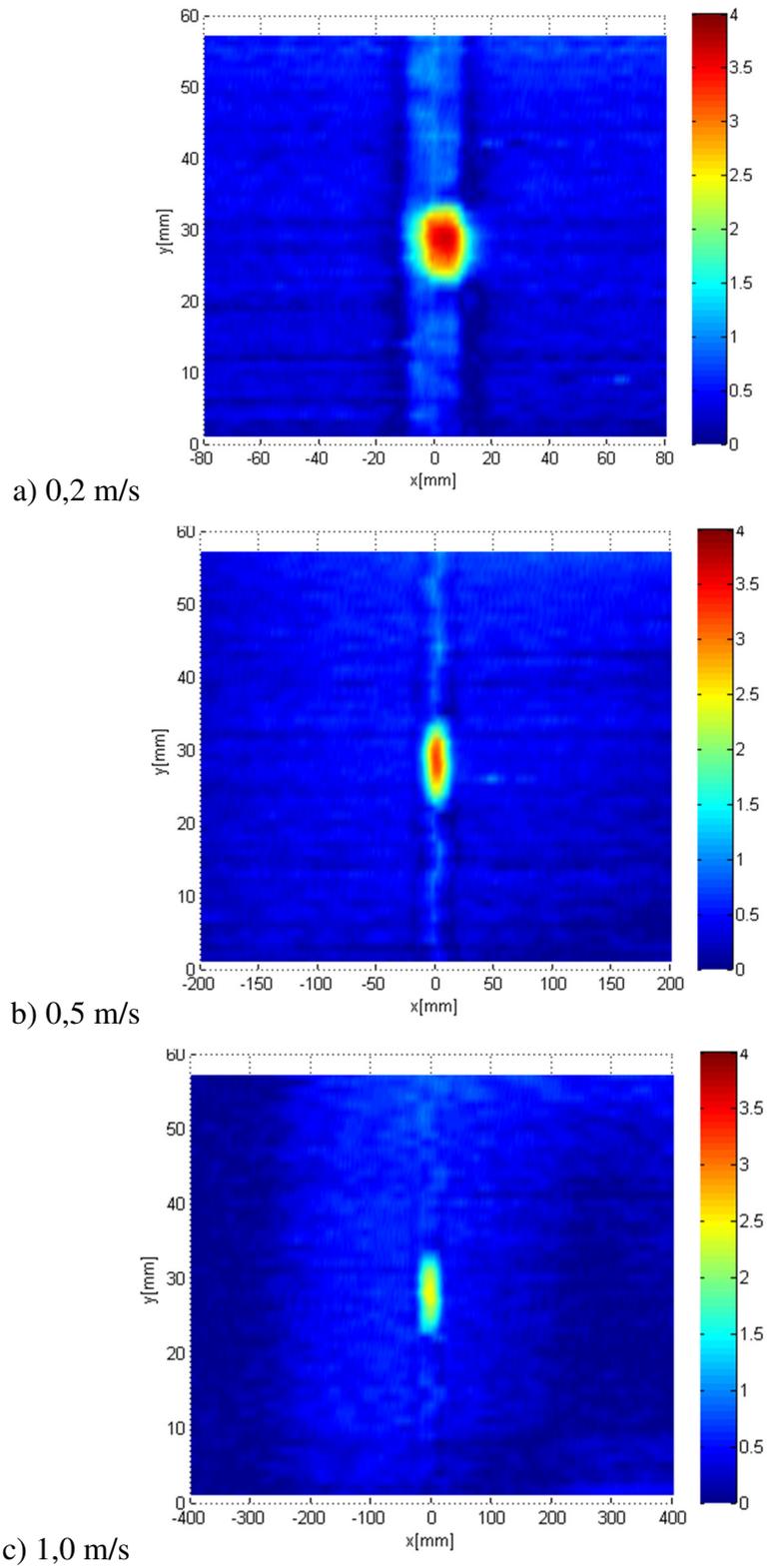


Figura 5.54: Influência da velocidade na detecção do entalhe de eletroerosão adjacente à solda a 0,2 m/s (a), a 5 m/s (b) e a 1,0 m/s (c) sem *lift-off*.

## 6. Conclusões e trabalhos futuros

### 6.1 Conclusões

Os resultados alcançados comprovaram a capacidade da técnica de correntes parasitas com configuração ortogonal para detecção de descontinuidades em juntas soldadas. Tal capacidade associada aos testes em velocidades relevantes para aplicação em campo demonstraram a viabilidade da aplicação da técnica para instrumentação de ferramentas de inspeção interna visando a detecção de trincas de fadiga em dutos cladeados.

Os parâmetros de inspeção, frequência, ganho vertical e rotação, alcançados a partir dos procedimentos de otimização desenvolvidos no trabalho, aprimoraram a capacidade de detecção do entalhe e se mostraram como uma metodologia relevante que pode trazer benefícios não só para inspeção com ferramentas de alto desempenho, com alta velocidade e grande fluxo de dados, mas para qualquer procedimento que utilize a técnica de correntes parasitas para identificar defeitos em materiais metálicos. Apesar de ter sido utilizado no trabalho para uma situação específica, os algoritmos desenvolvidos são genéricos e podem contribuir com o aprimoramento de outras situações de inspeção.

O trabalho mostrou ainda a importância de se correlacionar os sinais de eletroerosão com os sinais do objetivo final da inspeção, que para o presente caso foram trincas de fadiga. No entanto, a diferença encontrada entre os defeitos usinados e as trincas reais, traz à tona questões sobre a comparação com outros tipos de defeitos como: trincas de corrosão sob tensão, trincas de fluência, pites, etc., os quais são também comumente representados por defeitos usinados que podem ou não ser representativos para a situação de campo. No caso dos ensaios de comparação realizados no trabalho, verificou-se que a atenuação do sinal do entalhe de eletroerosão com abertura padrão necessária para que seja representativo para uma trinca de fadiga é da ordem de 25% do valor da amplitude de voltagem. Os resultados mostraram ainda que a morfologia da trinca pode ser desprezada, pois não influenciou os resultados.

Por fim, o estudo apresentado teve como objetivo avaliar as principais dificuldades associadas ao problema da detecção de trincas de fadiga no escopo da aplicação em ferramentas de inspeção interna. Os resultados alcançados foram

motivadores e mostraram a viabilidade de se aplicar a técnica de correntes parasitas para solução do problema de detecção de trincas de fadiga em juntas soldadas de dutos cladeados.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros destacam-se as seguintes atividades:

- Realizar testes com maiores velocidades e maiores *lift-off* para definir os parâmetros limites da ferramenta de inspeção;
- Realizar testes com trincas reais de fadiga em juntas soldadas;
- Montar protótipo para inspeção interna de pequenas seções de dutos;
- Verificar a influência da representação de trincas de corrosão sob tensão e trincas de fluência a partir de entalhes de eletroerosão;
- Projetar *pig* para inspeção de campo.

## Referências bibliográficas

[1] E. A. Santos. “Resistência à fadiga de tubo API 5L X65 cladeado e soldado circunferencialmente com eletrodos de Inconel® 625” [dissertação]. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos; 2016.

[2] Clad steel plate catalogue [Internet]. Tokyo 100-0011, Japan: JFE Steel Corporation; 2009 [citado em 1 Novembro 2017]. Disponível em:

<http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/catalog/c1e-009.pdf>

[3] Clad pipes [Internet]. Knesebeck, Alemanha: Butting Group; 2017 [citado 1 Novembro 2017]. Disponível em:

[https://www.butting.com/fileadmin/daten/redakteure/Download/EN/Prospekte\\_EN/BU TTING\\_Clad\\_pipes.pdf](https://www.butting.com/fileadmin/daten/redakteure/Download/EN/Prospekte_EN/BU TTING_Clad_pipes.pdf)

[4] Kukori TFP e TFT Catalogue [Internet]. Tokyo: Kuroki; 2013 [citado em 1 Novembro 2017]. Disponível em:

[http://www.kuroki.co.jp/ktp/pdf/Kuroki%20TFP&TFT%20Catalogue\(2013-05-10\).pdf](http://www.kuroki.co.jp/ktp/pdf/Kuroki%20TFP&TFT%20Catalogue(2013-05-10).pdf)

[5] E. S. Silva. “Propagação de trincas de fadiga em juntas soldadas circunferenciais de aços para risers rígido da classe API 5L grau X80” [Tese]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE; 2010.

[6] L. N. Yshii e M. S. G. Chiodo. “Aplicação de aços de alta resistência em dutos de transporte de óleo e gás: implicações sobre o projeto e construção”. Trabalho de formatura apresentado à Escola. Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Graduação em Engenharia, 2007.

[7] A. B. Andrés. “Crescimento de trincas por fadiga em juntas soldadas circunferenciais em aço da classe API 5L-X70 para risers rígidos” [Tese]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE; 2006.

[8] F. De Marco “Propagação de trincas de fadiga em juntas soldadas circunferenciais de aço API 5L X-65 para utilização em risers rígidos” [Tese]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE; 2002.

- [9] A. S, Cerqueira. “Avaliação da técnica de ultrassom *phased array* na inspeção de juntas soldadas dissimilares e cladeadas com diferentes espessuras de amanteigamento”. [Tese]. Porto Alegre- RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPGEM; 2009.
- [10] R. Jones, D. Karunakaran and J. Mair, “Reeled Clad SCR Weld Fatigue Qualification”. Offshore Technology Conference, OTC, 2011.
- [11] Freire J. “Engenharia de dutos. Rio de Janeiro”. Editora: ABCM, 2009.
- [12] Doosan Babcock Energy Limited. “Evaluation of the effectiveness of non-destructive testing screening methods for in-service inspection” RR 659 Research Report, Health and Safety Executive, 2009.
- [13] A. Albright, The Detection of Stress Corrosion Cracking in Natural Gas Pipelines Using Electromagnetic Acoustic Transducers [Masters Theses], University of Tennessee – Knoxville, 2007.
- [14] L. Kenneth, J. Merrit, R. Smith and J. Arnold. “PHMSA Research & Technical Perspectives”. Department of transportation, EUA, 2016
- [15] M. Ginten, T. Penny, I. Richardson and Q. Russel. “Integrity Management of Stress Corrosion Cracking in Pipelines – an Integrated Approach”. Pipeline Inspection Technical report ROSEN, Germany, 2014.
- [16] Innospection. “SLOFEC - Saturated Low Frequency Eddy Current - Fast Corrosion Screening Technique”, 2009.
- [17] K. Reber, M. Beller, “Ultrasonic in-line inspection tools to inspect older pipelines for cracks in girth and long-seam welds”. NDT Systems & Services AG, Stutensee, Germany, 2003.
- [18] C. Nageswaran, T. Gan. “Application of phased array ultrasonic inspection of girth welds for clad pipelines”. TWI Ltd, Granta Park, Great Abington, Cambridge CB21 6AL, UK, 2013.
- [19] J. Van der Ent, “World Pipeline Brazil”, Applus RTD, 2009.
- [20] J. Hansen. “The Eddy Current inspection method – part’. History and electrical theory”. Insight Vol 46, No 5, 2004.

- [21] Nondestructive Testing Handbook, Vol. 4 Electromagnetic Testing, 2nd Ed., (R. C. Mc Mater, P. McIntire, and M. L. Mester ed.), Columbus OH, American Society for Nondestructive Testing, 1986.
- [22] J. Blitz, Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing, 2nd Ed., New York, NY, Chapman & Hall, pp 94-181, 1997.
- [23] Non Destructive Testing Education [Internet]. Disponível em: [www.ndt-ed.org](http://www.ndt-ed.org)  
Acessado em 09 de Janeiro de 2018.
- [24] B. A. Abu-Nabah, P. B. Nagy. “Lift-off effect in high-frequency eddy current conductivity spectroscopy”. NDT&E International, 2007.
- [25] L. Junwei, D. Francis. “Analysis of Eddy Current Distribution in High Frequency Coaxial Transformer with Faraday Shield”. IEEE Transaction on Magnetics, 2006.
- [26] M. A. Freitas. “Monitoramento de tensão mecânica em risers flexíveis por eletromagnetismo”. Tese de Doutorado, PUC-Rio, 2009.
- [27] D. J. Griffiths. “Introduction to Electrodynamics”. 3a Edição, 1999.
- [28] N. Yusa, L. Janousek, Z. Chen and K. Miya, "Diagnostics of stress corrosion and fatigue cracks using benchmark signals", Materials Letters, vol. 59, no. 28, pp. 3656-3659, 2005.
- [29] K. Koyama, H. Hoshikawa, and N. Taniyama, “Investigation of Eddy Current Testing of Weld Zone by Uniform Eddy Current Probe” 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Rome, Italy, October, 2000.
- [30] H. Huang, N. Yusa, K. Miya, “Eddy current testing and sizing of fatigue cracks”, 12th A-PCNDT 2006 – Asia-Pacific Conference on NDT, Auckland, New Zealand, 2006.
- [31] N. Nakagawa, M. Yang, B. Larson, E. Madison, D. Raulerson, D. Thompson and D. Chimenti, "Study of the effects of EDM notch width on eddy current signal response", AIP Conference Proceedings, 2009.

- [32] B. Larson, C. Lo, N. Nakagawa, D. Thompson and D. Chimenti, "Investigation of the effects of notch width on eddy current response and comparison of signals from notches and cracks", 2010.
- [33] A. D. Watkins, D. C. Kunerth, "Eddy Current Examination of Spent Nuclear Fuel Canister Closure Welds" 2006 International High Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM), Idaho 2006.
- [34] D. Lamtenzan, G. Washer, and M. Lovez, "Detection and Sizing of Cracks in Structural Steel Using the Eddy Current Method" U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-00-018, November 2000.
- [35] J. Hansen. "The advantages of using Eddy Current Technology for weld inspection" 12<sup>th</sup> Conference on Technology Equipment, 2013.
- [36] N. Yusa, L. Janousek, M. Rebican, Z. Chen, K. Miya, N. Chigusa and H. Ito, "Detection of embedded fatigue cracks in Inconel weld overlay and the evaluation of the minimum thickness of the weld overlay using eddy current testing", Nuclear Engineering and Design, vol. 236, no. 18, pp. 1852-1859, 2006.
- [37] Chen, Z., Aoto, K., Miya, K., 2000. "Reconstruction of cracks with physical closure from signals of eddy current testing". IEEE Trans. Magn. 36, 1018–1022, 2000.
- [38] Chen, Z., Miya, K., 1998. "ECT inversion using a knowledge based forward solver. Journal of Nondestructive. Evaluation. 17 (3), 157–165, 1998.
- [39] Shi, Yan et al. "Theory and Application of Magnetic Flux Leakage Pipeline Detection." Ed. Vittorio M. N. Passaro. Sensors (Basel, Switzerland) 15.12 (2015): 31036–31055. PMC. Web. 8 Dec. 2017.
- [40] Wikipedia, "Hall effect sensor" [Internet]. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hall\\_effect\\_sensor](https://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect_sensor) Acessado em 08 de novembro de 2017.
- [41] Site Butting [Internet]. Disponível em: <https://www.butting.com/pt/tubos-metalurgicamente-cladeados/> Acessado em 06 de dezembro de 2017.
- [42] J. V. G. Rocha. "Otimização dos parâmetros de um sensor de correntes parasitas para detecção de trincas através de simulação eletromagnética". Dissertação de mestrado, COPPE - UFRJ, 2017.

- [43] C. G. Camerini. “Desenvolvimento de sondas de correntes parasitas para identificação e quantificação de fase sigma em aço inoxidável Duplex”. Dissertação de mestrado, COPPE - UFRJ, 2011.
- [44] J. M. A. Rebello, C. Camerini, J. V. G. Rocha e M. C. A. Lopez. “2012 Eddy current benchmark modeling of impedance variation in coil due to a thin longitudinal through-wall notch in an inconel 600 tube”. AIP Conference Proceedings, QNDE, 2012.
- [45] T. P. Theodoulidis, J. Martinos, and N. Poulakis. “Numerical results for the wfndec 2012 eddy current benchmark problem”. AIP Conference Proceedings, QNDE, 2012.
- [46] T. Chady, M. Enokizono. “Multi-frequency exciting and spectrogram-based ECT method”. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000.
- [47] A. Soares. “Correntes Parasitas” Editora, ABENDI, 1998.
- [48] Wikipedia, “Matriz de rotação” [Internet]. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Matriz\\_de\\_rota%C3%A7%C3%A3o](https://pt.wikipedia.org/wiki/Matriz_de_rota%C3%A7%C3%A3o) Acessado em 12 de Janeiro de 2018.