



ANÁLISE DE SINAIS DE CORRENTES PARASITAS PARA
IDENTIFICAÇÃO DE DESCONTINUIDADES EM TUBOS DE AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO NA REGIÃO DO ESPELHO EM TROCADORES DE CALOR

Joaquim Smiderle Côrte

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

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Rio de Janeiro
Dezembro de 2013

ANÁLISE DE SINAIS DE CORRENTES PARASITAS PARA
IDENTIFICAÇÃO DE DESCONTINUIDADES EM TUBOS DE AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO NA REGIÃO DO ESPELHO EM TROCADORES DE CALOR

Joaquim Smiderle Côrte

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

Examinada por:

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.

Prof. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

Prof. Sérgio Souto Maior Tavares, D.Sc.

Prof. Elineudo Pinho de Moura, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2013

Côrte, Joaquim Smiderle

Análise de sinais de correntes parasitas para identificação de descontinuidades em tubos de inoxidável austenítico na região do espelho em trocadores de calor/ Joaquim Smiderle Côrte. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XVI, 156 p.: il.; 29,7cm

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 152-156.

1. Correntes parasitas. 2. Ensaio magnético. 3. Inspeção. 4. Permutadores de calor. I. Rebello, João Marcos Alcoforado. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

À minha família pelo apoio e incentivo durante todo o período do mestrado.

AGRADECIMENTOS

- Ao professor João Marcos Alcoforado Rebello pela sua paciência, disposição, interesse e estímulo ao presente trabalho.
- Aos amigos Adélio Gonçalves Borges, Mauro Duque de Araújo e Paulo Cesar Francisco Henriques o meu reconhecimento e eterna gratidão, que sem medir esforços, participaram efetivamente em todas as fases deste trabalho, contribuindo com ideias, sugestões, críticas e orientações.
- A empresa Araújo Engenharia pelo apoio em toda fase experimental, disponibilizando todos os recursos para a realização dos ensaios, participando desde a elaboração dos corpos de prova até a aquisição dos dados e análise dos resultados.
- Ao meu coordenador Francisco Neves, pela confiança na minha indicação para este curso na COPPE.
- Ao meu amigo José Adailson de Souza pelo incentivo e ajuda na idealização do trabalho.
- Aos meus colegas e amigos da Petrobras pelo incentivo, apoio e compreensão durante todo o período do mestrado.
- A Petrobras pela liberação parcial do meu tempo.

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

ANÁLISE DE SINAIS DE CORRENTES PARASITAS PARA IDENTIFICAÇÃO DE
DESCONTINUIDADES EM TUBOS DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO NA
REGIÃO DO ESPELHO EM TROCADORES DE CALOR

Joaquim Smiderle Côrte

Dezembro/2013

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O objetivo deste estudo foi analisar os sinais de correntes parasitas e estimar os limites de detecção de descontinuidades na região do espelho de trocadores de calor casco e tubo. Um dispositivo simulando o espelho, padrões e corpos de prova com trincas longitudinais e circunferenciais foram confeccionados em aço inoxidável AISI 321, em diversas profundidades e localizadas nas regiões expandida, não expandida e de transição, representativas dentro do espelho. Utilizou-se aparelhagem e softwares com sistemas de multifrequência e multiparâmetros, sonda convencional tipo bobina e, para melhorar a detectabilidade, sondas especiais do tipo *Pancake* e *Array*. Os resultados mostraram que a utilização destes sistemas de aquisição e sondas especiais é essencial para confiabilidade do ensaio, suprimindo uma deficiência da sonda convencional e possibilitando uma maior eficácia da inspeção.

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

ANALYSIS OF EDDY CURRENT SIGNALS FOR DISCONTINUITIES
IDENTIFICATION IN AUSTENITIC STAINLESS STEEL TUBES WITHIN THE
HEAT EXCHANGER TUBESHEET

Joaquim Smiderle Côrte

December/2013

Advisor: João Marcos Alcoforado Rebello

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The aim of this study was to analyze eddy current signals and estimate the limits of discontinuities detection in the tubesheet region of shell and tube heat exchangers. A prototype simulating the tubesheet, standards and specimens with longitudinal and circumferential cracks located at various depths in expanded, unexpanded and transition representative regions within the tubesheet was used in stainless steel AISI 321. Equipment and software systems with multifrequency and multiparameter, conventional probe coil type, special probes Pancake and Array type, were used to improve detectability. The results showed that the use of these systems for the acquisition and special probes were essential to estimate the reliability of the test by filling a deficiency of conventional probes and improving the efficiency of the inspection.

SUMÁRIO

1-	INTRODUÇÃO.....	1
2-	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	5
2.2	PERMUTADORES DE CALOR	6
2.2.1	Principais características dos permutadores casco e tubo.....	7
2.2.2	Feixe tubular e ligação tubo-espelho.....	10
2.2.3	Danos em permutadores casco e tubo	12
2.2.4	Corrosão sob tensão - CST.....	13
2.2.5	Corrosão por pites	18
2.2.6	Corrosão por frestas	21
2.3	END APLICADOS NA INSPEÇÃO DE FEIXES TUBULARES	23
2.3.1	Sistema de Inspeção Interna Rotativa (<i>IRIS-Internal Rotary Inspection System</i>)	24
2.3.2	Campo Remoto (<i>RFT- Remote Field Testing</i>)	26
2.3.3	Vazamento de fluxo magnético (<i>MFL - Magnetic Flux Leakage</i>)	27
2.3.4	Correntes parasitas – Princípios do ensaio	27
2.3.4.1	Plano complexo de impedância e a representação do sinal de medição	29
2.3.4.2	Propriedades que afetam as correntes parasitas.....	30
2.3.4.3	Efeito pelicular (<i>Skin Effect</i>).....	34
2.3.4.4	Efeito do afastamento sonda peça (<i>Lift-off</i>).....	36
2.3.4.5	Padrões de referência e calibração no ensaio de correntes parasitas	37
2.3.4.6	Principais tipos de sondas	38
2.3.5	Ensaio de correntes parasitas em feixes tubulares.....	39
2.3.5.1	Sensibilidade das sondas.....	40
2.3.5.2	Características do sinal do defeito	44
2.3.5.3	Seleção da frequência de teste	44
2.3.5.4	Calibração com o padrão ASME	47
2.3.5.5	Estimativa da profundidade da descontinuidade	48
2.3.5.6	Ensaio de correntes parasitas com multifrequência	50

2.3.5.7	Recentes desenvolvimentos na inspeção por correntes parasitas	51
2.3.5.8	Vantagens do uso do ensaio de correntes parasitas em permutadores.....	59
3-	MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1	MATERIAIS.....	61
3.2	EQUIPAMENTOS E SONDAS	70
3.2.1	Sistema de Aquisição de Dados	70
3.2.2	Sondas utilizadas.....	71
3.2.2.1	Sonda tipo Bobina.....	71
3.2.2.2	Sonda tipo <i>Pancake</i>	72
3.2.2.3	Sonda tipo <i>Array</i>	73
3.3	METODOLOGIA.....	74
4-	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
4.1	INFLUÊNCIA DO ESPELHO E MANDRILAGEM NO ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS	81
4.1.1	Efeito do espelho	82
4.1.2	Efeito da mandrilagem	84
4.1.3	Efeito conjunto espelho, mandrilagem e ranhuras.....	85
4.2	INFLUÊNCIA DO ESPELHO NA CALIBRAÇÃO CONVENCIONAL COM O PADRÃO ASME.....	87
4.3	DETECTABILIDADE DOS PADRÕES DE TRINCAS LONGITUDINAIS (TL) E DE TRINCAS CIRCUNFERENCIAIS (TC).....	93
4.3.1	Padrão de TL.....	93
4.3.2	Padrão de TC	99
4.4	DETECTABILIDADE DOS CORPOS DE PROVA COM TL E DE TC	109
4.4.1	Corpo de prova TL 100%	109
4.4.2	Corpo de prova TL 50%	115
4.4.3	Corpo de prova TL 20%	119
4.4.4	Corpo de prova TC 100%	121
4.4.5	Corpo de prova TC 50%	125
4.4.6	Corpo de prova TC 20%	129
4.5	SONDAS MISTAS <i>PANCAKES</i>	131
4.6	SONDAS <i>ARRAY</i>	137

5-	CONCLUSÕES.....	148
6-	TRABALHOS FUTUROS	151
7-	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Descontinuidades típicas em tubo de permutador em aço inoxidável AISI 321 na região de fresta tubo-espelho	2
Figura 1.2 - Análise de falha em tubo retirado após ensaio de correntes parasitas no campo	3
Figura 2.1 - Características construtivas do permutador de calor casco e tubo.....	7
Figura 2.2 - Permutador de calor casco e tubo com espelho flutuante.....	8
Figura 2.3 - Permutador de calor casco e tubo com espelhos fixos.....	9
Figura 2.4 - Permutador de calor casco e tubo com tubos em U.....	9
Figura 2.5 - Detalhes do feixe tubular durante a fabricação do permutador	10
Figura 2.6 - Regiões presentes na zona de contato tubo-espelho	11
Figura 2.7 - Relação entre a concentração de cloreto, threshold de tensão e o estado do fluido na CST dos aços inoxidáveis da série 300	15
Figura 2.8 - Efeitos da concentração de oxigênio e cloreto na CST do aço AISI 304 na faixa de temperatura de 250-300°C	16
Figura 2.9 - Relação do tempo de falha por CST com os níveis de cloreto e a temperatura do meio para aços inoxidáveis da série 300	17
Figura 2.10 - (a) TC por CST na RT da ligação tubo-espelho de aço inoxidável AISI 316 Ti micrografia mostrando trincas transgranulares típicas de CST	18
Figura 2.11 - (a) Superfície externa de tubo em aço inoxidável 304 deteriorada por corrosão por pites (b) Visualização do centro do pit (c) Análise química do depósito cristalino	20
Figura 2.12 - CCT e CPT para diversos aços inoxidáveis austeníticos.....	21
Figura 2.13 - Tubos de aços inoxidáveis AISI 321 com indicação de corrosão nas frestas da RNE	22
Figura 2.14 - Corrosão galvânica no espelho em aço carbono com tubo de aço inoxidável austenítico	22
Figura 2.15 - Detalhes do contato do tubo com a chicana mostrando o desgaste devido a folga excessiva.....	23

Figura 2.16 - Detalhes dos componentes no ensaio IRIS	25
Figura 2.17 - Representação gráfica B, C-Scan.....	25
Figura 2.18 - Componentes do ensaio de campo remoto	26
Figura 2.19 - Componentes do ensaio MFL.....	27
Figura 2.20 - Princípio de funcionamento do método de correntes parasitas.....	28
Figura 2.21 - Plano complexo de impedância	29
Figura 2.22 - Profundidade de penetração para a frequência de 200 Hz e de 10 kHz....	32
Figura 2.23 - Variação da impedância a partir das variações das propriedades dos materiais	33
Figura 2.24 - Variação da densidade das correntes parasitas em função da profundidade	35
Figura 2.25 - Profundidade de penetração padrão.....	35
Figura 2.26 - Curva de <i>lift-off</i> para uma amostra de alumínio no plano de impedâncias	37
Figura 2.27 - Tipos de sondas (a) de superfície, (b) externa e (c) interna.....	39
Figura 2.28 - Sinais característicos de defeitos adquiridos com as sondas absoluta e diferencial	41
Figura 2.29 - Influência da orientação das descontinuidades na detectabilidade com sonda bobina.....	42
Figura 2.30 - (a) Sonda <i>Pancake</i> (b) Sonda ziguezague	43
Figura 2.31 - Ilustração esquemática da variação da densidade de corrente e alteração do fluxo em torno do defeito no tubo	44
Figura 2.32 - Influência da frequência nos sinal da descontinuidade no diagrama de impedância.....	45
Figura 2.33 - Aparência do sinal na frequência f_{90}	46
Figura 2.34 - Influência da frequência na discriminação dos sinais.....	46
Figura 2.35 - Comparação das características dos sinais nas sondas absolutas e diferenciais.....	47
Figura 2.36 - Sinais característicos dos defeitos padrão.....	48
Figura 2.37 - Gráfico mostrando a correlação entre o ângulo de fase do sinal e profundidade.....	49
Figura 2.38 - Gráfico mostrando a correlação entre amplitude do sinal e profundidade	50
Figura 2.39 - Efeito do ângulo de falha na capacidade de detecção bobina T/ R.....	54

Figura 2.40 - (a) Sonda T/R para detecção de TC (b) sonda T/R para detecção de TL .	54
Figura 2.41 - Exemplo de sinais sonda T/R em tubo de Incoloy com trincas de fadiga induzida por vibração excessiva do tubo	55
Figura 2.42 - Tipos de fontes magnéticas e princípio do ensaio com sensor <i>Hall</i>	56
Figura 2.43 - Diagrama de bloco com sensores <i>Hall</i>	56
Figura 2.44 - Modelo de arranjo cilíndrico para as sondas com sensores <i>Hall</i>	57
Figura 2.45 – PoD das inspeções realizadas na região tubo-espelho	58
Figura 2.46 - Esquema de execução do ensaio de correntes parasitas	59
Figura 3.1 - Foto do CP 1 padrão ASME	62
Figura 3.2 - Foto do CP 3	63
Figura 3.3 - Desenho esquemático do espelho com o CP 4	63
Figura 3.4 - Foto do CP 4 inserido no espelho	64
Figura 3.5 - Foto do CP 5 - padrão de TL	65
Figura 3.6 - Foto do CP 6 - padrão de TC	65
Figura 3.7 - Foto do CP 7 com 03 TL 100% da espessura do tubo.....	66
Figura 3.8 -Foto do CP 8 com 03 TL 50% da espessura do tubo.....	66
Figura 3.9 - Foto do CP 9 com 03 TL 20% da espessura do tubo.....	67
Figura 3.10 - Foto do CP 10 com 03 TC 100% da espessura do tubo.....	67
Figura 3.11 - Foto do CP 11 com 03 TC 50% da espessura do tubo.....	68
Figura 3.12 - Foto do CP 12 com 03 TC 20% da espessura do tubo.....	68
Figura 3.13 - Sistema de aquisição Olympus Multiscan MS5800	70
Figura 3.14 - Principais características da sonda bobina utilizada.....	71
Figura 3.15 - Principais características da sonda <i>Pancake</i> utilizada	72
Figura 3.16 - Principais características da sonda bobina utilizada.....	73
Figura 3.17 - Foto do CP4 fixo no espelho	76
Figura 3.18 - Padrão de TL (CP 5), com a TL 60% dentro do espelho.....	76
Figura 3.19 - Padrão de TC (CP 6), com a TC 80% dentro do espelho	77
Figura 3.20 - CP7 com trinca TL 100% dentro do espelho.....	78
Figura 4.1 - Regiões do feixe tubular próximo ao espelho.....	82
Figura 4.2 - Registros do ensaio de correntes parasitas no CP 2 fora e dentro do espelho	83
Figura 4.3 - Registros do ensaio de correntes parasitas no CP 3 fora do espelho	84

Figura 4.4 - Registros do ensaio de correntes parasitas CP 4 dentro do espelho no furo com ranhuras.....	86
Figura 4.5 - Registro dos parâmetros dos sinais do padrão ASME com destaque para o furo 100%	88
Figura 4.6 - Registro dos parâmetros da calibração do padrão ASME furo 20%	89
Figura 4.7 - Amplitudes dos sinais do padrão ASME fora e dentro do espelho	91
Figura 4.8 - Profundidades dos sinais do Padrão ASME fora e dentro do espelho.....	92
Figura 4.9 - Registro da varredura do CP 5 fora do espelho	94
Figura 4.10 - Registro dos sinais da TL 100% do CP 5	95
Figura 4.11 - Registro dos sinais da TL 20% do CP 5	96
Figura 4.12 - Registro dos sinais da TL 40% do CP	97
Figura 4.13 - Registro da varredura do Padrão de trincas TC	99
Figura 4.14 - Registro dos sinais TC 100% do padrão TC.....	100
Figura 4.15 - Registro dos sinais TC 40% do padrão TC.....	101
Figura 4.16 - Registro dos sinais TC 60% do padrão TC.....	102
Figura 4.17 - Comparação de amplitudes x profundidades padrão ASME x TL x TC fora do espelho	104
Figura 4.18 - Desenho esquemático da influência das descontinuidades com 60% de profundidade dos padrões ASME, TL e TC no fluxo de corrente induzida.....	106
Figura 4.19 - Comparação de amplitudes x profundidades dos padrão ASME x TL x TC dentro do espelho.....	107
Figura 4.20 - Registro do sinal da trinca (a) e aspecto metalográfico (b)	109
Figura 4.21 - Localização da TL 100%, esquema de varredura e registro dos sinais de correntes parasitas no CP 7.....	110
Figura 4.22 - Sinal da TL 100% na RNE	112
Figura 4.23 - Sinal da TL 100% na RT	113
Figura 4.24 - Sinal da TL 100% na RE	114
Figura 4.25 - Registro dos sinais de correntes parasitas no CP 8.....	115
Figura 4.26 - (a) (b) (c) Sequência de registros do CP7 TL 50% fora do espelho	117
Figura 4.27 - (a) (b) (c) Sequência de registros do CP8 TL 50% dentro do espelho ...	119
Figura 4.28 - Registro dos sinais de correntes parasitas no CP9.....	120
Figura 4.29 - Sinal da TC 50% na RNE (a) e RT fora do espelho	121

Figura 4.30 - Registro dos sinais de correntes parasitas no CP 10.....	122
Figura 4.31 - Sinal da TC 100% na RNE	123
Figura 4.32 - Sinal da TC 100% na RT	124
Figura 4.33 - Sinal da TC 100% na RE	125
Figura 4.34 - Sinais de correntes parasitas no CP 11	126
Figura 4.35 - Sinal da TC 50% na RNE	127
Figura 4.36 - Sinal da TC 50% na RT	128
Figura 4.37 - Sinal da TC 50% na RE dentro do espelho.....	129
Figura 4.38 - Registro dos sinais de correntes parasitas no CP 12.....	130
Figura 4.39 - Sinais das descontinuidades do Padrão ASME com a sonda <i>Pancake</i> ...	133
Figura 4.40 - Sinal da TC 60% do padrão com a sonda <i>Pancake</i> dentro do espelho...	134
Figura 4.41 - Registros do ensaio com sonda <i>Pancake</i>	135
Figura 4.42 - Visualização em 3D do ensaio de correntes parasitas no CP 2 com a sonda <i>Array</i>	138
Figura 4.43 - Visualização em 3D do ensaio de correntes parasitas no CP 1 com a sonda <i>Array</i>	139
Figura 4.44 - Sinais das descontinuidades no ensaio de correntes parasitas com a sonda <i>Array</i>	140
Figura 4.45 - Sinais das descontinuidades no ensaio de correntes parasitas no CP 10 com a sonda <i>Array</i> fora e dentro do espelho	141
Figura 4.46 - Sinais das descontinuidades no ensaio de correntes parasitas no CP 11 com a sonda <i>Array</i> fora e dentro do espelho	142
Figura 4.47 - Sinais das descontinuidades no ensaio de correntes parasitas no CP 12 com a sonda <i>Array</i> fora e dentro do espelho	143
Figura 4.48 - Regiões do feixe tubular próxima ao espelho.....	145
Figura 4.49 - Detectabilidade TL Sonda Bobina.....	145
Figura 4.50 - Detectabilidade TC Sonda Bobina.....	146
Figura 4.51 - Detectabilidade TL Sonda <i>Pancake</i>	146
Figura 4.52 - Detectabilidade TC Sonda <i>Pancake</i>	147
Figura 4.53 - Detectabilidade TC Sonda <i>Array</i>	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química de aços inoxidáveis austeníticos.....	5
Tabela 2.2 - Aplicações dos ensaios relacionando os tipos de defeitos detectáveis, sua localização, materiais, preparo de superfície e as velocidades típicas dos ensaios.....	60
Tabela 3.1 - Composição química dos materiais utilizados	61
Tabela 3.2 - Descrição simplificada da confecção dos corpos de prova.....	68
Tabela 4.1 - Parâmetros dos sinais do padrão ASME fora e dentro do espelho.....	90
Tabela 4.2 - Parâmetros dos sinais das trincas do padrão TL fora e dentro do espelho.	98
Tabela 4.3 - Parâmetros dos sinais das trincas do padrão TC fora e dentro do espelho	103

1- INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são equipamentos de extrema importância nas plantas de processo de unidades petroquímicas, refinarias e plataformas. Existem vários modelos e tipos de trocadores e, em função da sua elevada robustez e versatilidade, o modelo casco e tubo é o preferido em várias aplicações, principalmente quando se requer maior segurança e confiabilidade operacional.

No entanto, uma variedade de modos de degradação nos tubos do feixe tubular resulta na perda da estanqueidade e contaminações entre fluidos, gerando paradas do equipamento para extensivos reparos e, por vezes, sua substituição. O ensaio de correntes parasitas tem sido o mais utilizado nas inspeções em serviço para detecção dos danos no feixe tubular e avaliar a integridade do equipamento. Entretanto, em diversas situações a confiabilidade da inspeção não tem sido satisfatória devido à dificuldade de interpretação dos sinais quando os danos são localizados na região do tubo sob o espelho. Nesta região os sinais sofrem influência do próprio espelho, das ranhuras (*grooves*), do mandrilamento do tubo e de possíveis depósitos na região de fresta.

É fato que a não utilização de aparelhagem e sondas atualizadas tecnologicamente contribuem para esta baixa efetividade. De acordo com a norma ASME, Seção V, Artigo 8, a partir de 2008 passou a ser mandatório a utilização de sistemas de aquisição de dados com multifrequências e multiparâmetros para inspeção de tubos não ferromagnéticos instalados em trocadores de calor. Até esta revisão, a instrumentação era definida na elaboração do procedimento de inspeção, podendo se utilizar sistemas com monofrequência. Muitos procedimentos utilizados nas inspeções em serviço ainda não atendem a este requisito de sistemas de aquisição multifrequências.

Um caso típico de aplicação onde a eficácia da inspeção tem sido baixa é na inspeção de feixe tubular em aço inoxidável austenítico, devido a danos como pites e corrosão sob tensão (CST) se localizarem, principalmente, em regiões de frestas no espelho. Nestes casos, mesmo utilizando o ensaio de correntes parasitas, às vezes o equipamento volta a operar e em pouco tempo apresenta novamente vazamentos entre

fluidos. Por esta razão é necessário avaliar os limites de detectabilidade da técnica, pois esta situação compromete a continuidade operacional e a integridade do equipamento.

As figuras 1.1 e 1.2 mostram algumas descontinuidades típicas encontradas durante inspeção em tubos de trocadores em aço inoxidável AISI 321 dentro do espelho. Na figura 1.1 podemos observar a presença de quatro trincas localizadas na região da fresta tubo/espelho, duas com características circunferenciais e duas longitudinais. Estas trincas foram detectadas no ensaio de campo de correntes parasitas como sendo um único defeito. Este mesmo resultado foi obtido após a retirada do tubo e ensaios em laboratório.

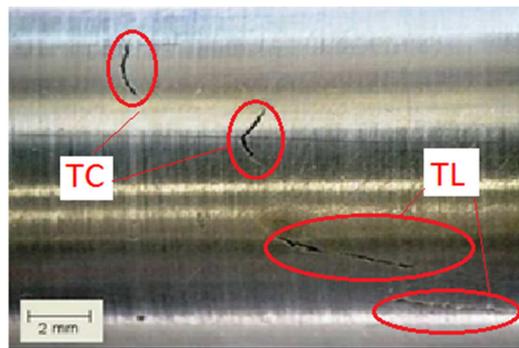


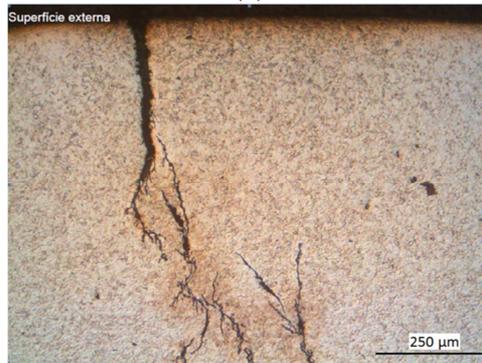
Figura 1.1 - Descontinuidades típicas em tubo de permutador em aço inoxidável AISI 321 na região de fresta tubo-espelho

Fonte: O autor (2013).

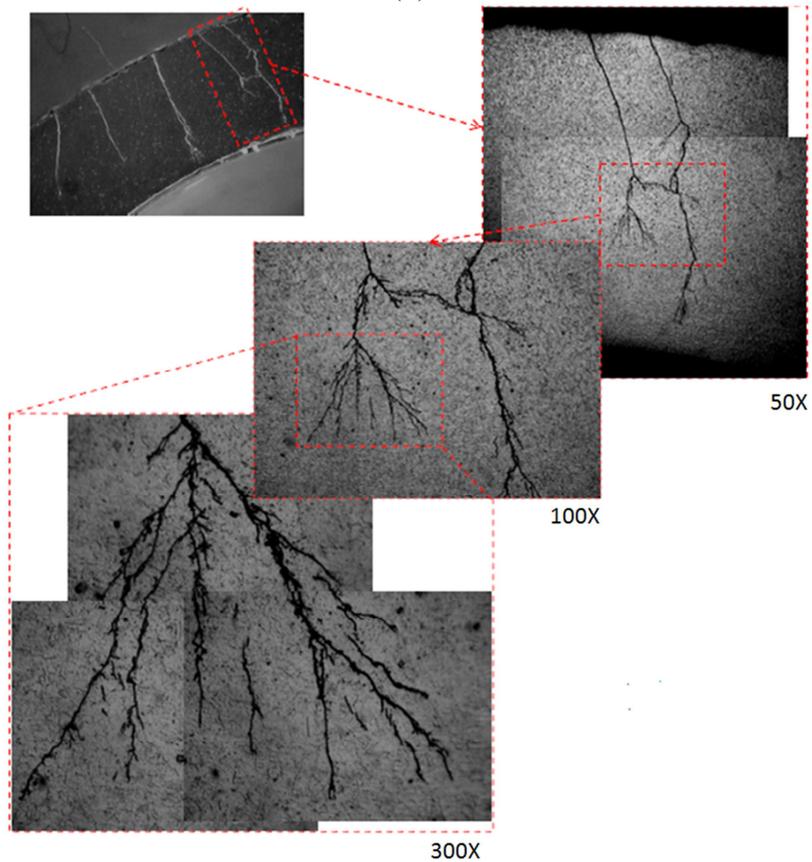
A figura 1.2 mostra o resultado de uma análise de falha realizada em outro tubo após indicação de descontinuidade passante no ensaio de correntes parasitas no campo. A figura 1.2 (a) revela o resultado do ensaio de líquido penetrante (LP) confirmando a presença de uma trinca longitudinal na região de fresta e uma trinca com orientação circunferencial na região de mandrilagem. A figura 1.2 (b) revela a seção da trinca longitudinal e mostra que a mesma tem origem na superfície externa, possuindo aspecto ramificado. A figura 1.2 (c) mostra na parte superior uma seção deste tubo indicando a presença de várias trincas e confirmando sua origem na superfície externa. Com o aumento da visualização podemos ver mais claramente trincas finas e confirmar o aspecto ramificado, típicas de CST, neste caso específico por cloretos. Estes resultados indicam claramente que, nestes casos, a inspeção por correntes parasitas foi confiável.



(a)



(b)



(c)

Figura 1.2 - Análise de falha em tubo retirado após ensaio de correntes parasitas no campo

(a) resultados de LP (b) e (c) análises metalográficas da seção da trinca longitudinal

Fonte: O autor (2013).

O objetivo do presente trabalho foi analisar os sinais de correntes parasitas na região do espelho e estimar os limites de detecção de descontinuidades tipicamente encontradas em feixes tubulares fabricados em aço inoxidável AISI 321. Para isto, foram confeccionados dispositivos visando simular o espelho, padrões e corpos de prova com trincas longitudinais e circunferenciais, em diversas profundidades, localizadas na região não expandida (RNE), na região expandida (RE) e na região de transição (RT) representativas dos danos típicos em serviço dentro do espelho.

Foram utilizados aparelhagem e softwares com sistemas de multifrequência e multiparâmetros de uso comercial. A metodologia consistiu na obtenção e posterior comparação dos sinais de correntes parasitas dos corpos de prova, fora e dentro do espelho. Inicialmente foi utilizada a sonda convencional tipo bobina, avaliada a influência do espelho e da mandrilagem nos sinais das descontinuidades e aplicada a operação de mixagem para supressão de sinais indesejáveis. Com isto foram estimados os limites de detectabilidade das trincas longitudinais e circunferenciais para este modelo de sonda, fora e dentro do espelho. Para melhorar a detectabilidade, principalmente das trincas circunferenciais, foram empregadas sondas especiais do tipo *Pancake* e uma nova sonda tipo *Array*, recentemente disponibilizada no mercado. Esta é a primeira aplicação que se tem conhecimento no Brasil do modelo *Array* e ainda assim em caráter experimental.

O presente trabalho está organizado da seguinte maneira: no capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica, abrangendo resumidamente os temas: aço inoxidável austenítico, permutador de calor e os principais danos em tubos de aços inoxidáveis austeníticos. Neste capítulo também são apresentados os principais Ensaio Não Destrutivos (END) aplicáveis a feixes tubulares, sendo inserido um item específico de ensaio de correntes parasitas em feixes tubulares utilizando sondas internas. O capítulo 3 é referente a materiais e métodos, onde são detalhados os aspectos construtivos dos corpos de prova e padrões, a instrumentação e sondas utilizadas e a sistemática de aquisição dos resultados. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, no capítulo 6 as sugestões de trabalho futuros e no capítulo 7 são indicadas as referências bibliográficas.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços inoxidáveis austeníticos (AIA) apresentam uma estrutura cúbica de face centrada (CFC) e trata-se de uma liga não ferromagnética na condição recozida. A estrutura CFC é atingida por meio do uso de elementos austenitizantes como o Ni, Mn e N. A maioria desses aços não são endurecíveis por tratamentos térmicos, apenas por trabalho a frio e solução sólida. Geralmente possuem excelentes propriedades criogênicas e boa resistência mecânica em elevadas temperaturas. O teor de Cr pode variar de 15 a 26%, Ni até 35% e Mn até 15%. Os aços da série 200 contêm N, Mn de 4 a 15,5%, e Ni até 7%. Os da série 300 contêm maiores teores de Ni e o Mn pode chegar até 2%. Os elementos Mo, Cu, Si, Al, Ti e Nb podem ser adicionados para garantir certas propriedades em condições específicas, por exemplo, o Mo melhora a resistência à corrosão por pites (ASM, 1990).

Os aços inoxidáveis austeníticos constituem uma larga classe de aços inoxidáveis com diversas aplicações. A tabela 2.1 apresenta algumas composições contendo os elementos principais. O Cr (na faixa de 15 a 26%) confere aos aços a resistência à corrosão e o Ni favorece a estabilidade da austenita, quando presente na faixa de 5 a 37%. Como pode ser observado na tabela 2.1, os aços da série 200 contêm menor teor de Ni que nos aços da série 300, porém possuem elevados teores de Mn e N. Em alguns aços, o Mo pode está presente na faixa de 2,0 a 4,0% para melhorar a resistência à corrosão por pites do material.

Tabela 2.1 - Composição química de aços inoxidáveis austeníticos

<i>Material AISI [%peso]</i>	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	N	Outros
202	≤ 0,15	7,5-10,0	≤ 1,0	17,0-19,0	4,0-6,0	-	0,25	-
205	0,12-0,15	14,0-15,5	≤ 1,0	16,5-18,0	1,0-1,75	-	0,32-0,40	-
304	≤ 0,08	≤ 2,0	≤ 1,0	18,0-20,0	8,0-10,5	-	-	-
316	≤ 0,08	≤ 2,0		16,0-18,0	10,0-14,0	2,0-3,0	-	-

<i>Material AISI [%peso]</i>	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	N	Outros
			≤ 1,0					
321	≤ 0,08	≤ 2,0	≤ 1,0	17,0-19,0	9,0-12,0	-	-	Ti≥5x%C
654 SMO	≤ 0,02	≤ 2,0	≤ 0,50	24,0-25,0	21,0-23,0	7,0-8,0	0,45-0,48	Cu=0,3-0,6

Fonte: PLAUT et al., (2007).

Os aços inoxidáveis são amplamente utilizados em feixe tubular de permutadores de calor nos sistemas de circuito fechado de água de aquecimento e de resfriamento. Nestas aplicações os aços austeníticos apresentam uma boa resistência à corrosão, desde que seja controlado o teor de cloreto e as superfícies do material ausentes de depósitos e sujeiras. Por exemplo, na ausência de incrustações, frestas e de estagnação do fluido o aço AISI 304 pode resistir à corrosão por pites em meios contendo teores de cloreto de até 1000 ppm (ASM, 1987). Uma ou mais destas condições citadas podem permitir os íons de cloreto se concentrar na superfície do metal e iniciar o pite, reduzindo sua resistência à corrosão.

Existem aços inoxidáveis de alto desempenho que são utilizados para resistir níveis de cloretos elevados como os encontrados em salmoura e água do mar, destacando-se os super-austeníticos e os duplex (ASM, 1987). Além da elevada resistência à corrosão por cloretos, os aços duplex possuem uma maior resistência mecânica comparada aos austeníticos, que se traduz em menores espessuras e pesos dos componentes. Estes aços são utilizados em aplicações específicas.

2.2 PERMUTADORES DE CALOR

Os vasos de pressão constituem um dos equipamentos mais importantes nas plantas de processo, destacando-se os equipamentos com função de troca térmica entre os fluidos, denominados trocadores de calor. Nesta categoria estão enquadrados os permutadores propriamente ditos que, dependendo da finalidade, podem ser denominados como aquecedores, resfriadores, condensadores, refervedores e resfriadores de ar.

Existem vários modelos e tipos de trocadores, trabalhando com fluidos variados e em diversas faixas de temperatura e pressão. Sua seleção leva em consideração, além

destas variáveis, a eficiência de troca térmica, a perda de carga, peso, dimensões, etc. A seguir destacaremos o modelo casco e tubo que é o de maior aplicação na indústria *offshore* e escopo do nosso trabalho.

2.2.1 Principais características dos permutadores casco e tubo

Como já mencionado anteriormente o modelo casco e tubo é um dos mais utilizados nos diversos segmentos industriais devido à sua robustez e versatilidade. Têm larga aplicação nos processos de refino de petróleo e indústrias químicas, como geradores de vapor, condensadores, aquecedores de água de alimentação da caldeira e radiadores de óleo em usinas de energia. Nas unidades de produção de petróleo *offshore* são utilizados em diversos sistemas, tais como o de aquecimento do óleo e resfriamento de gás (TELLES, 2001).

Este tipo de permutador é basicamente constituído de um casco que envolve um feixe tubular, de tal forma que um dos fluidos circula por dentro dos tubos e o outro pelo exterior, permitindo grande superfície de troca de calor. São projetados e fabricados atendendo a um código de construção, sendo o mais utilizado o código ASME SEC VIII Div. I (ASME, 2008). Para o tipo casco e tubo, este código também exige o atendimento a norma específica TEMA (1999), que contempla todos os requisitos de projeto dos vários modelos existentes em função da aplicação específica. A figura 2.1 mostra um desenho esquemático deste permutador com os seus principais componentes.

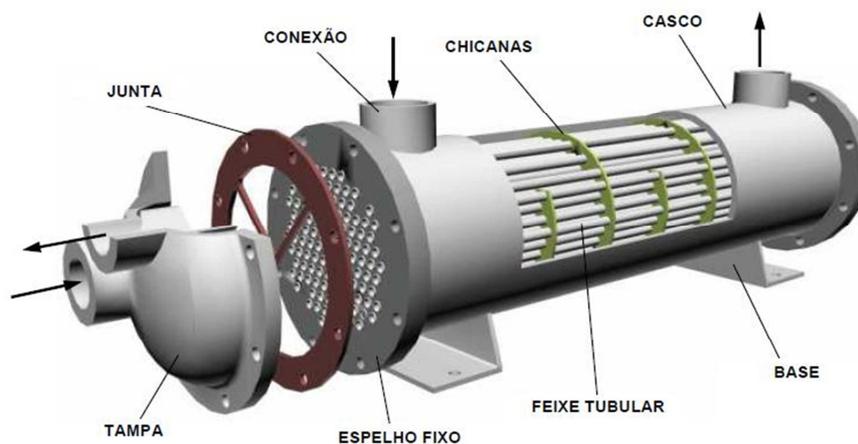


Figura 2.1 - Características construtivas do permutador de calor casco e tubo

Fonte: TROCALOR (2007).

Vários materiais são utilizados na confecção do feixe tubular dentre eles as ligas Cu-Ni, latão, ligas de titânio, aço carbono, aços inoxidáveis austeníticos e duplex. Atualmente, observa-se o aumento da aplicação destas duas últimas classes nos feixes tubulares.

Quanto aos aspectos construtivos os três principais tipos de permutadores casco e tubo são:

- Com espelho flutuante: é o tipo de permutador de calor mais versátil e o mais caro. Em sua montagem, um espelho é fixado ao casco e o outro está livre para se mover (flutuar) dentro do casco. Isto permite uma livre expansão do feixe de tubos, assim como a limpeza das superfícies externa e interna dos tubos. Na figura 2.2 é mostrado um modelo de permutador de calor do tipo espelho flutuante (MUKHERJEE, 1998).

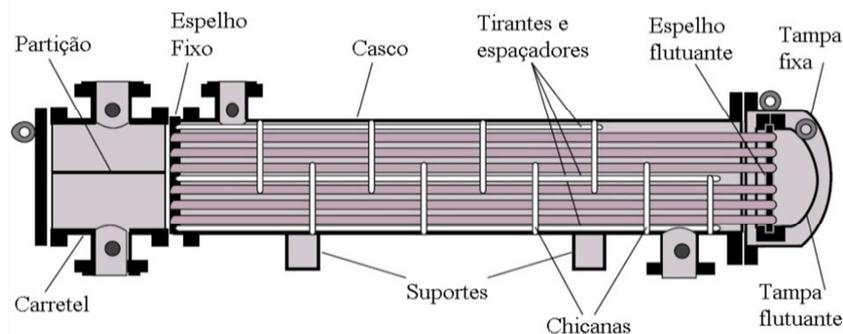


Figura 2.2 - Permutador de calor casco e tubo com espelho flutuante

Fonte: MUKHERJEE (1998).

- Com espelhos fixos: são construídos com trechos de tubos retos que são suportados em suas extremidades por espelhos soldados ao casco (figura 2.3). Apresentam as vantagens de ter baixo custo devido à facilidade de construção, a possibilidade de limpeza mecânica interna dos tubos após a remoção da tampa e os vazamentos do fluido no lado do casco é minimizada por não existirem juntas flangeadas. Uma desvantagem deste tipo de permutador é não permitir a limpeza externa do feixe de tubos, uma vez que o feixe é soldado ao casco impossibilitando a sua remoção. Isto limita sua aplicação a serviços em que o fluido do lado do casco não gera resíduo e/ou depósitos (MUKHERJEE, 1998).

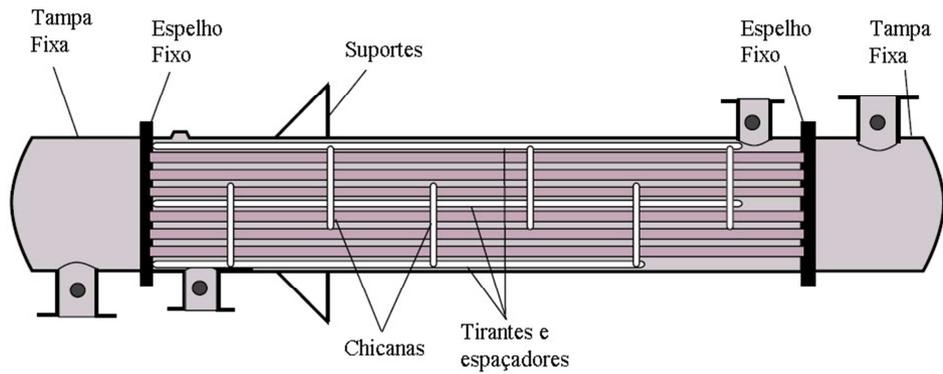


Figura 2.3 - Permutador de calor casco e tubo com espelhos fixos

Fonte: MUKHERJEE (1998).

- Com tubos em U: como o nome já sugere, os tubos do permutador são conformados em forma de U (figura 2.4), apresentando apenas um espelho. No entanto, a redução no custo devido à presença de apenas um espelho é eliminada pelo aumento do diâmetro do casco e pelo processo de conformação dos tubos. Estes permutadores apresentam as vantagens de permitir expansão ou contração do feixe de tubos devido a diferenças térmicas, uma vez que uma extremidade encontra-se livre, e a possibilidade de limpeza externa do feixe de tubos por ser removível. Devido ao formato em U, os tubos apresentam certa desvantagem no momento da limpeza mecânica interna, já que algumas ferramentas utilizadas não são efetivas nos trechos curvos, limitando seu uso com fluidos que não geram resíduos no interior dos tubos (MUKHERJEE, 1998).

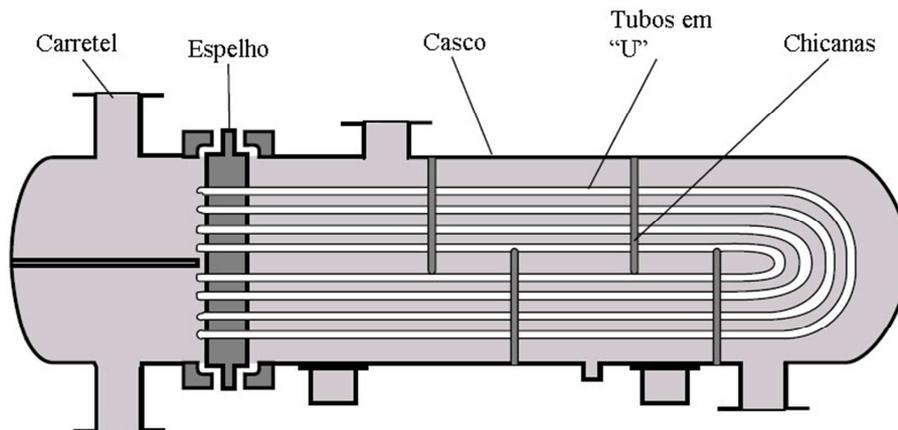


Figura 2.4 - Permutador de calor casco e tubo com tubos em U

Fonte: MUKHERJEE (1998).

2.2.2 Feixe tubular e ligação tubo-espelho

Uma etapa muito importante na fabricação deste equipamento é a confecção do feixe tubular. A figura 2.5 mostra um feixe já pronto para ser inserido no casco, destacando os seus principais componentes: espelho, tubos e chicanas.

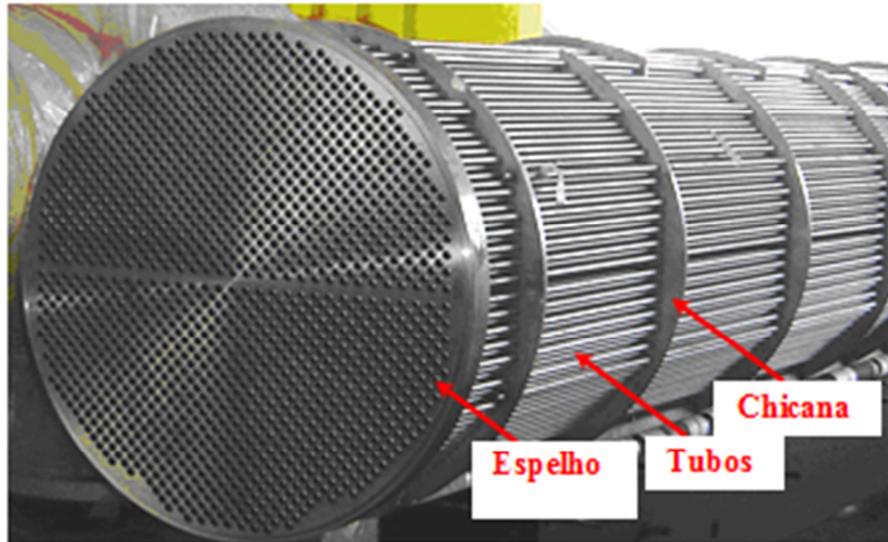


Figura 2.5 - Detalhes do feixe tubular durante a fabricação do permutador

Fonte: O autor (2013).

A incidência de falhas nas ligações tubo-espelho é frequente e de alto custo. Os métodos mais utilizados nestas ligações são por mandrilagem do tubo ou através da solda de selagem/resistência. No método de mandrilagem, como veremos em detalhes a seguir, a estanqueidade é obtida apenas através da deformação dos tubos em ranhuras, não sendo aplicável a serviços com fluidos perigosos, letais e, independente do fluido, serviços em altas pressões. Este tipo de fixação é normalmente utilizado nos permutadores com espelhos flutuantes (removíveis).

Quando é necessária uma maior garantia da estanqueidade esta ligação é obtida pela realização de uma solda de selagem, ou de resistência, do tubo na face do espelho. Normalmente, é utilizada nos permutadores com espelhos fixos (não removíveis).

A mandrilagem é a operação de expansão das extremidades dos tubos junto aos furos do espelho, realizada por meio de um dispositivo cônico (mandril) que gira em torno do seu eixo radial. Além de ancorar os tubos no espelho esta operação tem como

objetivo promover a estanqueidade entre os fluidos dos lados casco e tubo. Esta operação pode ser manual ou automática, hidráulica ou pneumática (STEWART; ORAN, 2012). Para melhorar esta vedação, são feitas ranhuras anulares nos furos do espelho, permitindo a deformação da parede do tubo nas mesmas.

Após a mandrilagem, a extremidade do tubo apresentará uma configuração com três regiões distintas, como mostrado na figura 2.6. A RE é a região que sofreu a deformação plástica e que mantém o contato do tubo com o espelho. A RNE é a região do tubo que não sofreu deformação plástica do processo de mandrilagem, que, por apresentar um diâmetro menor que o furo do espelho, favorecerá o aparecimento de uma fresta. A RT é a região de transição entre a RE e RNE que sofreu uma deformação plástica e pela própria configuração também apresentará fresta.

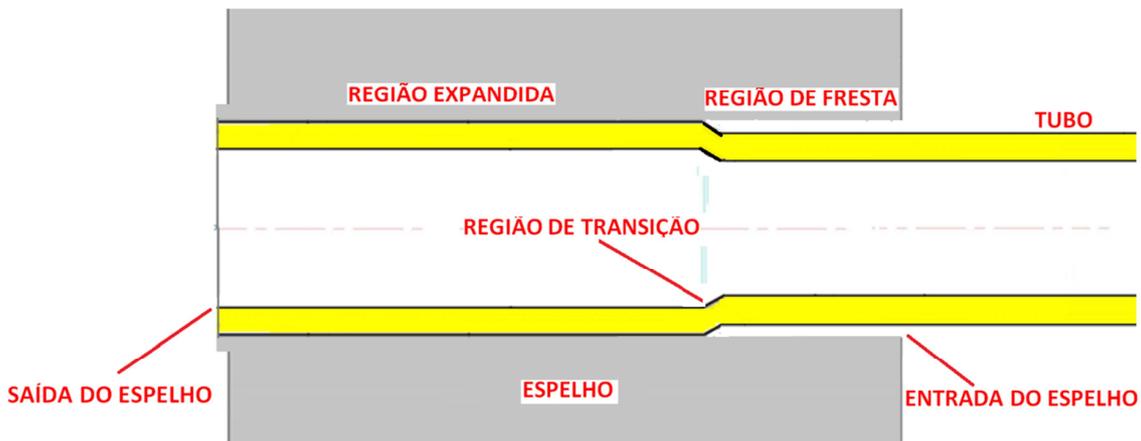


Figura 2.6 - Regiões presentes na zona de contato tubo-espelho

Fonte: O autor (2013).

É de extrema importância o controle desta operação, que pode resultar em sérios danos aos componentes. Uma série de fatores deve ser considerada para o sucesso desta operação, tais como as propriedades dos materiais (tubo e espelho), o acabamento superficial, as tolerâncias dimensionais e os ajustes da expansão. Por exemplo, uma deformação excessiva pode resultar em deformações e distorções no espelho, além de nuclear trinca nos tubos (BPC, 1996).

A grande incidência de problemas com CST em permutadores em serviço se concentra na junção do tubo com espelho, devido às tensões residuais e o trabalho a frio

que se desenvolvem na RT entre RE e RNE do tubo durante a mandrilagem (KUPPERMAN et al., 2002).

A adequada seleção dos materiais destes componentes e a especificação correta da combinação expansão/soldagem são essenciais para garantir a máxima integridade e confiabilidade do serviço. Por esta razão é de vital importância a inspeção conhecer os detalhes de projeto e de construção desta ligação, já que uma grande parte dos danos se localiza nesta região.

2.2.3 Danos em permutadores casco e tubo

Os principais mecanismos que causam deterioração e falhas com maior frequência estão ligados à corrosão, os quais são complexos e muito afetados pelas condições operacionais. Os demais como desgaste, abrasão ou fadiga, também são de difícil controle, pois envolvem fenômenos de vibração que são atrelados a geometrias e condições locais de fluxo.

As intervenções de parada no equipamento em operação normalmente são devidas às incrustações (resultando no aumento da perda de carga), falha nas juntas de vedação (resultando em vazamento externo) e a perda de estanqueidade pelo feixe tubular. Esta última ocorrência é a mais relevante e de maior comprometimento, tanto no aspecto operacional quanto no de segurança. Vários fatores podem contribuir para este problema, sendo os mecanismos mais atuantes os danos por corrosão (alveolar, pites, CST e frestas) e os danos mecânicos (erosão, abrasão e outros). Dependendo dos fluidos de trabalho pode-se ter uma perigosa contaminação de fluidos, além de uma redução da eficiência da troca térmica. Esta contaminação normalmente resulta na parada da unidade para não comprometer a integridade dos demais equipamentos. Geralmente, são necessários estudos complementares para uma correta avaliação do dano.

Apesar de sua conhecida elevada resistência à corrosão, os aços inoxidáveis austeníticos sofrem alguns tipos de corrosão em determinados meios, principalmente na presença de cloreto. Em geral, quando aplicados em feixes tubulares de trocadores de calor podem sofrer CST, corrosão por pites e corrosão por fresta (EL-ROUBI *et al.*, 2006).

2.2.4 Corrosão sob tensão - CST

CST é um termo utilizado para descrever um mecanismo de falha em materiais através da propagação de trincas induzidas pelo meio corrosivo. É um típico problema dos metais e ligas que apresentam resistência à corrosão generalizada pela formação de um filme passivo, tais como aços inoxidáveis austeníticos, ligas de alumínio, ligas de níquel, etc.. Uma definição genérica do mecanismo de CST é a fratura de um material pela ação simultânea de tensões trativas (residuais ou aplicadas), microestrutura susceptível e condições do meio corrosivo (concentrações de O e Cl⁻, temperatura e pH) (EL-ROUBI *et al.*, 2006,).

As taxas de corrosão resultantes são geralmente baixas e as tensões nominais que causam CST estão frequentemente abaixo do limite de escoamento do material. A CST se caracteriza pela formação de trincas que favorecem a ruptura brusca do material, sendo um dos mecanismos de degradação mais severos que influenciam no tempo de vida de componentes metálicos (SCHVARTZMANI *et al.*, 2010).

A suscetibilidade de ligas metálicas à CST depende de fatores como, composição química, microestrutura, processo de fabricação e tratamento térmico sofrido pelo material. Os teores de carbono e cromo aparecem como variáveis importantes quando se avalia a composição química. O tamanho de grão e a presença e localização de inclusões e precipitados são também variáveis relevantes na avaliação da resistência de materiais a este fenômeno. Duas principais fontes de tensão são capazes de promover o processo de CST, as tensões resultantes das condições de operação (pressão, temperatura e carregamento mecânico) e as tensões residuais (provenientes de soldagem, operações de conformação mecânica, tratamento mecânico superficial, transformações de fase, etc.). O meio e a temperatura de operação também são fatores que contribuem de maneira marcante para a CST. As concentrações de oxigênio e hidrogênio, o potencial de corrosão e o pH da solução desempenham um importante papel neste processo. Locais que operam a elevadas temperaturas exibem trincas mais rapidamente do que regiões onde existam menores temperaturas. Este processo é ativado termicamente e pode ser representado pela lei de Arrhenius (SCHVARTZMANI *et al.*, 2010).

Como já mencionado a temperatura é um dos parâmetros mais importantes sobre a influência da CST em meios contendo cloretos. Acredita-se que os aços inoxidáveis austeníticos não são susceptíveis à CST à temperatura ambiente, mas podem sofrer este tipo de corrosão a temperaturas acima de 60°C (EL-ROUBI *et al.*, 2006). Entretanto, alguns autores comentam que estes aços podem sofrer o trincamento por CST (em meios contendo cloretos) à temperatura ambiente em duas condições: quando sensibilizados ou quando houver impregnação de partículas de ferro em sua superfície. A impregnação de partículas de ferro funciona como acumulador de cloretos da atmosfera favorecendo a CST (KHATAK, RAJ, 2002). Com um aumento da temperatura acima de 60°C, tem-se uma diminuição do tempo até a fratura do material por CST (EL-ROUBI *et al.*, 2006).

Outros parâmetros que devem ser observados com muita atenção são: a concentração localizada de cloreto e estado do fluido de trabalho. Durante serviço pode ocorrer uma concentração por evaporação ou uma concentração num filme superficial na qual esteja sofrendo perda de calor que pode acelerar o processo de CST (KHATAK, RAJ, 2002). A figura 2.7 mostra que o fluido no estado vapor é mais crítico que a fase líquida, para um caso de um aço inoxidável austenítico 18/8, a 180°C. Nestas condições, observou-se o trincamento na presença de 300ppm de Cl⁻ (fase líquida). Já na fase o vapor, o trincamento foi observado em teores de apenas 10ppm de Cl⁻.

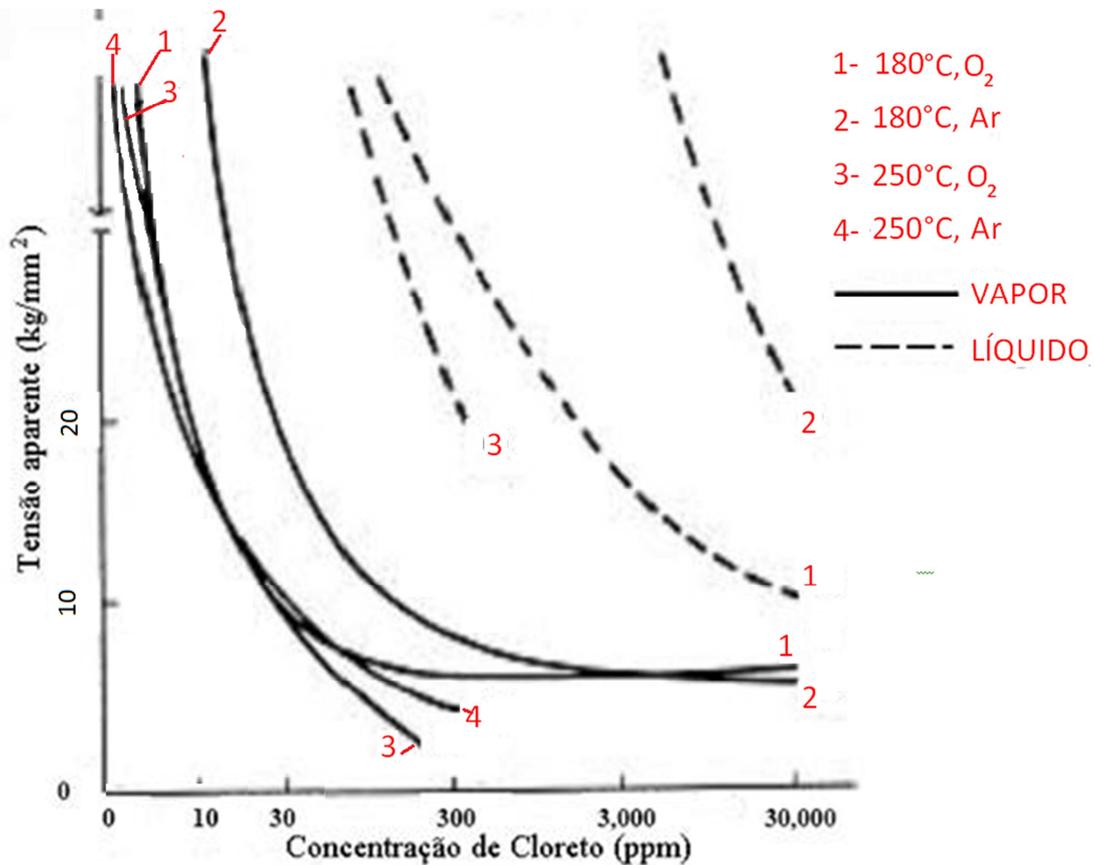


Figura 2.7 - Relação entre a concentração de cloreto, threshold de tensão e o estado do fluido na CST dos aços inoxidáveis da série 300

Fonte: Adaptado de EL-ROUBI et al. (2006).

A presença do oxigênio tem efeito significativo sobre a CST por cloreto. A figura 2.8 mostra que com o teor de oxigênio de 0,01ppm o aço inoxidável AISI 304 tolerou um teor de cloreto em torno de 800 ppm numa faixa de temperatura de 250 a 300°C até o aparecimento de CST. Já para um teor de oxigênio de 0,1 ppm tolerou apenas 10 ppm de cloreto até a falha (EL-ROUBI *et al.*, 2006).

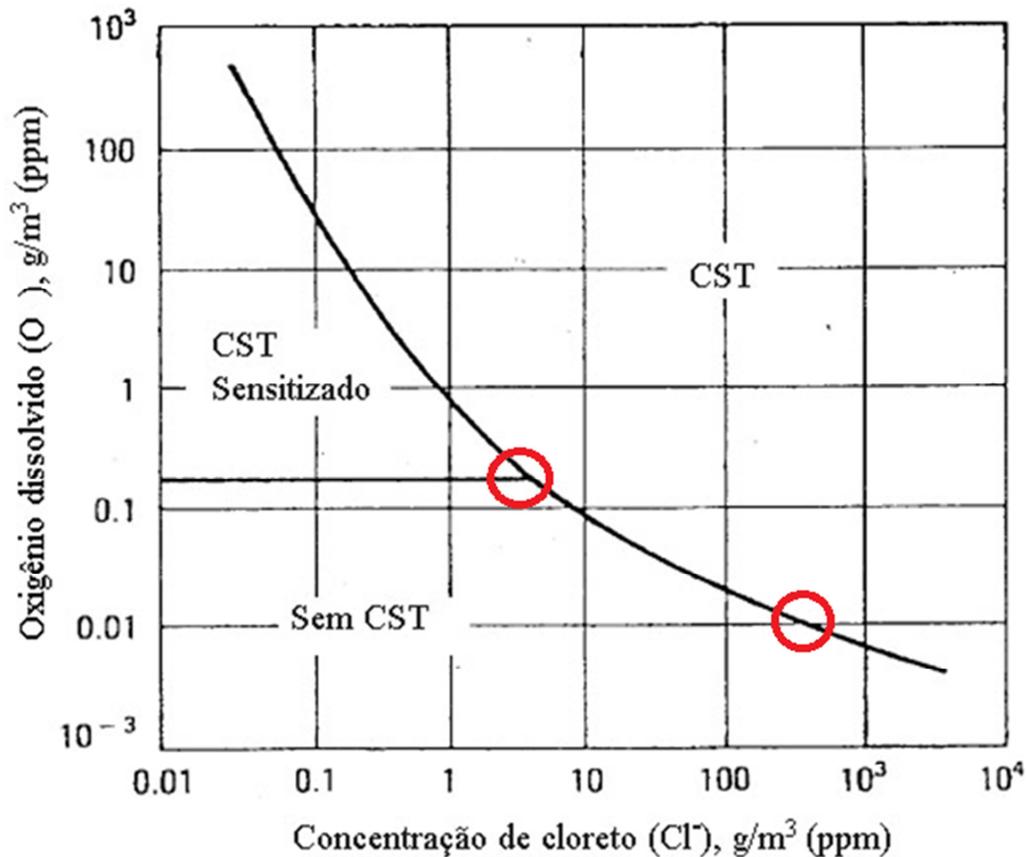


Figura 2.8 - Efeitos da concentração de oxigênio e cloreto na CST do aço AISI 304 na faixa de temperatura de 250-300°C

Fonte: Adaptado de EL-ROUBI et al. (2006).

Outra contribuição de EL-ROUBI *et al.* (2006) sobre o dano de CST pode ser observada na figura 2.9, que mostra a relação do tempo de falha do material com os níveis de cloreto e a temperatura do meio. Aumentando a agressividade do meio, isto é, elevando o teor de Cl⁻ e/ou temperatura no qual o material está inserido, ocorrerá uma diminuição da sua vida útil ao dano por CST. A linha em destaque representa uma média de tempo para uma temperatura considerada e que necessitam ser usadas com um fator de segura de 10 vezes o teor de cloreto.

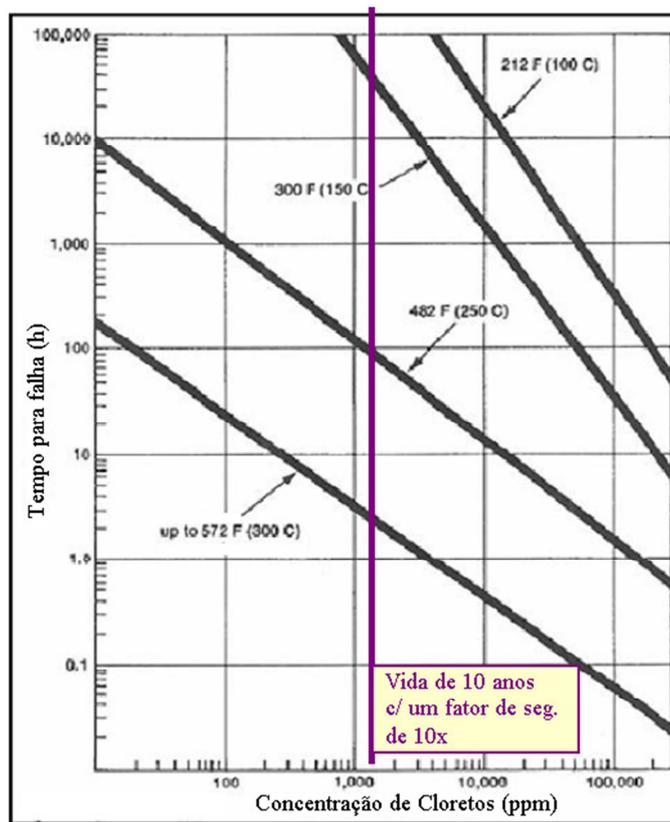


Figura 2.9 - Relação do tempo de falha por CST com os níveis de cloreto e a temperatura do meio para aços inoxidáveis da série 300

Fonte: Adaptado de EL-ROUBI et al. (2006).

Trincas decorrentes deste processo corrosivo podem ser transgranulares ou intergranulares. Porém, macroscopicamente, são sempre perpendiculares ao sentido de aplicação das tensões. Fraturas transgranulares são menos comuns que as intergranulares, mas ambas podem existir em um mesmo sistema ou na mesma região falhada, dependendo das condições existentes. O comportamento da falha é característico daquele apresentado por um material frágil, embora as ligas metálicas normalmente suscetíveis sejam intrinsecamente dúcteis [3-4]

A figura 2.10 (a) apresenta o aspecto macro de tubo de troca térmica em aço inoxidável AISI 316 Ti com trinca característica de CST em meio de cloreto. O trincamento ocorreu na RE dentro do espelho. Na figura 2.10 (b) é mostrada uma metalografia com trincas transgranulares típicas da CST.

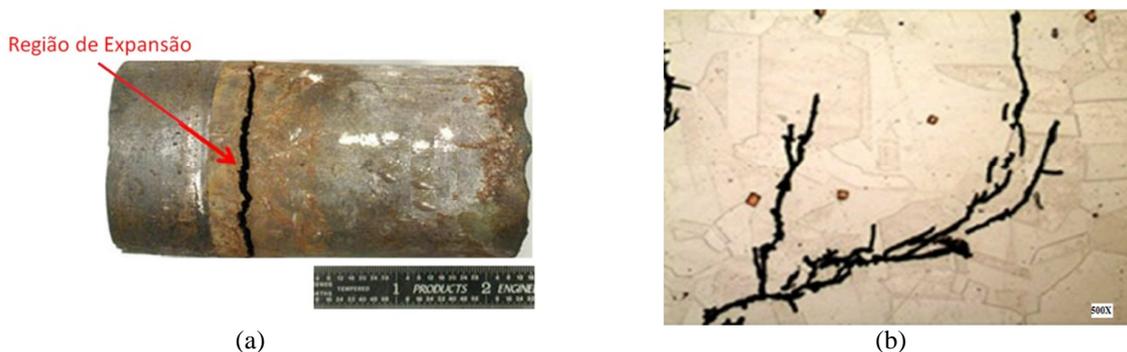


Figura 2.10 - (a) TC por CST na RT da ligação tubo-espelho de aço inoxidável AISI 316 Ti micrografia mostrando trincas transgranulares típicas de CST

Fonte: MTi (2012).

2.2.5 Corrosão por pites

A corrosão por pite é uma forma de corrosão localizada que ocorre somente em superfícies metálicas que estão no estado passivo, a exemplo dos aços inoxidáveis. Esta passividade é devido à formação de um filme de óxido protetor nas superfícies aeradas (regiões catódicas), que funcionam como uma barreira entre o metal e o meio. As regiões pouco aeradas do metal podem apresentar comportamento anódico em relação a regiões passivadas (com comportamento catódico), e serem preferencialmente as regiões de iniciação da corrosão por pites. O filme pode ser rompido nos pontos de menor espessura ou de maior fragilidade, quando aplicados elevados potenciais de eletrodo e se atinge o potencial de pite do metal numa determinada solução contendo certos ânions, como exemplo, o cloreto. Embora o metal tenha maior afinidade pelo O_2 para potenciais mais elevados a adsorção dos íons CL^- é favorecida em certas regiões, formando os pites. As regiões de ataque são determinadas pelo acabamento superficial da camada passiva que cobre a superfície metálica e fatores como a relação entre uma pequena área anódica e uma grande área catódica, diferenças de pH, temperatura, concentração do meio corrosivo e outras são determinantes na definição do potencial de pite.

Os aços inoxidáveis austeníticos podem sofrer um forte ataque localizado na presença de cloretos, principalmente em regiões que apresentam uma heterogeneidade metalúrgica. A deterioração por pites em meios contendo cloreto é um tipo muito grave

de corrosão devido à rapidez com que seções metálicas podem ser perfuradas e este processo é intensificado na presença de oxigênio em solução (EL-ROUBI *et al.*, 2006, ASM, 1987).

Vários elementos podem influenciar na resistência à corrosão por pites nos aços inoxidáveis austeníticos em meios contendo cloretos, mas os principais são: Cr, Mo e N. Para se determinar quantitativamente o efeito destes elementos na resistência à corrosão por pites são utilizadas várias fórmulas para representar a Resistência Equivalente ao Pite (PREN - Pitting Resistance Equivalent Number) como as indicadas nas equações 2.1 e 2.2 a seguir. Quanto maior o valor do PREN maior deverá ser a resistência à corrosão por pites do material (SEDRIKS, 1996).

$$\text{PREN} = (\% \text{Cr}) + 3,3 (\% \text{Mo}) + 16(\% \text{N}) \quad \text{Equação 2.1}$$

$$\text{PREN} = (\% \text{Cr}) + 3.3 (\% \text{Mo} + 0.5 \% \text{W}) + 16(\% \text{N}) \quad \text{Equação 2.2}$$

A temperatura e o pH são conhecidos por influenciarem na corrosão por pites. Assim, em condições de baixas temperaturas e elevados pH, os aços inoxidáveis austeníticos se tornam imunes à corrosão por pites. Entretanto, para um meio particular, um tipo de aço inoxidável pode ser caracterizado por uma única temperatura, ou uma faixa muito estreita de temperaturas, acima do qual irão iniciar a corrosão por pites, e abaixo do qual a corrosão não ocorrerá. Esta temperatura é conhecida como temperatura crítica de pite (TCP ou *CPT – Critical Pitting Temperature*). Assim, é possível selecionar um tipo que não estará sujeito à corrosão por pites se o meio e a temperatura não excederem os níveis críticos (EL-ROUBI *et al.*, 2006, ASM, 1990).

A figura 3.5(a) mostra em destaque a presença de pites em um feixe tubular de aço inoxidável AISI 304, observando seu aspecto localizado. Na figura 3.5(b) podemos observar a visualização no microscópio eletrônico de varredura (MEV) o centro do pit (figura sem indicação do aumento). A figura 3.5(c) mostra o resultado do ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) revelando uma elevada concentração de cloro (Cl), ferro (Fe) e de oxigênio (O), com traços de potássio (K) e cálcio (Ca) no centro do pit.

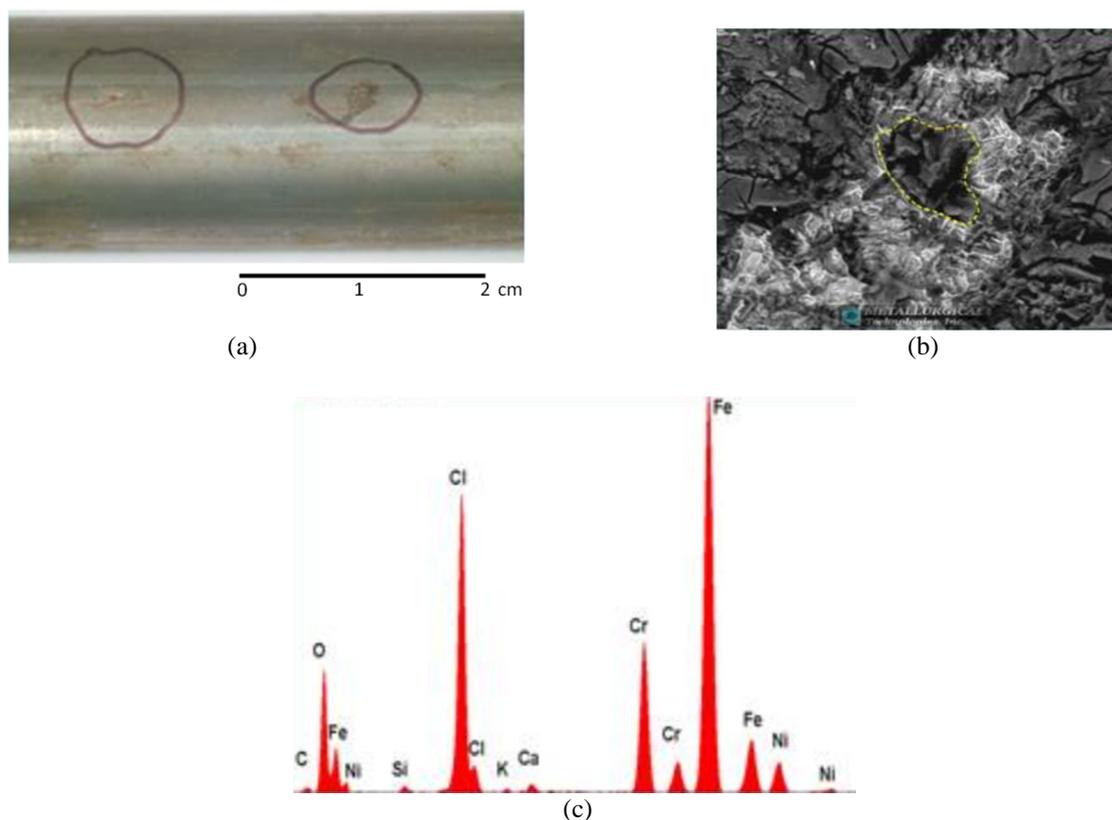


Figura 2.11 - (a) Superfície externa de tubo em aço inoxidável 304 deteriorada por corrosão por pites (b) Visualização do centro do pit (c) Análise química do depósito cristalino

Fonte: MTi (2012).

Algumas medidas podem ser tomadas visando minimizar a corrosão por pites, agindo sobre os aspectos fundamentais da raiz do problema (ASM, 1987), tais como:

- Reduzir a agressividade do meio ambiente - concentração de cloreto, temperatura, acidez e agentes oxidantes.
- Utilização de materiais mais resistentes – ligas com adição de Mo, revestimento com liga de alta resistência à corrosão.
- Modificar o projeto do sistema - evitando fendas, eliminar soluções estagnadas, e garantir a drenagem adequada.

A aplicabilidade de qualquer uma das medidas mitigadoras acima mencionadas, entre outras, é dependente de cada situação específica. Assim, recomenda-se uma revisão e análise de históricos de casos bem sucedidos na aplicação destas medidas.

2.2.6 Corrosão por frestas

A corrosão por frestas pode ser considerada uma forma grave de corrosão por pites. Qualquer fenda, quando do resultado de uma união metal/metal, incrustações ou depósitos tende a restringir o acesso do oxigênio resultando no ataque por fresta. Na prática, é extremamente difícil prevenir todas as fendas, mas todos os esforços devem ser realizados para evitá-las.

Ligas com elevados teores de Cr, em especial com elevado Mo, são mais resistentes ao ataque por fresta (crévice). Assim como existe uma temperatura crítica de pite para um meio em particular, existe uma temperatura crítica de fresta (TCC ou CCT – *Critical Crevice Temperature*). A CCT pode ser útil na seleção de um material suficientemente resistente para uma aplicação específica (ASM, 1990). A taxa de corrosão por fresta será elevada quanto maior for a diferença entre a CCT e a temperatura do meio (EL-ROUBI *et al.*, 2006). A figura 2.12 mostra que, para um dado material e em um determinado meio, a CCT será sempre inferior a CPT.

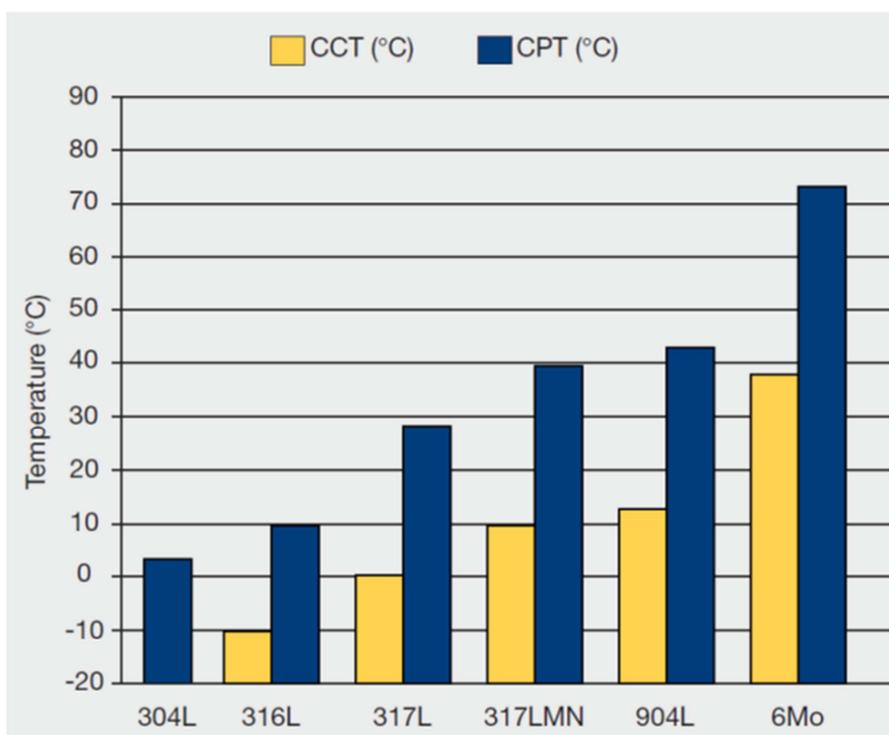


Figura 2.12 - CCT e CPT para diversos aços inoxidáveis austeníticos

Fonte: IMO A (2009).

Na figura 2.13 são mostrados tubos de aço inoxidáveis austeníticos AISI 321 retirados de permutadores em operação que sofreram o mecanismo de corrosão por fresta devido a cloretos na RNE da ligação tubo-espelho.



Figura 2.13 - Tubos de aço inoxidáveis AISI 321 com indicação de corrosão nas frestas da RNE

Fonte: O autor (2013).

Um problema frequente é o uso de materiais dissimilares na fabricação de feixe tubular, que dependendo das condições de serviço propicia o dano por corrosão galvânica. A figura 2.14 ilustra este mecanismo de dano em espelho de aço carbono com tubos de aço inoxidável austenítico AISI 304.



Figura 2.14 - Corrosão galvânica no espelho em aço carbono com tubo de aço inoxidável austenítico

Fonte: STEWART E ORAN (2012).

Os danos mecânicos estão normalmente associados a problemas na fabricação e falha de algum componente e são agravados com condições de fluxo acima do projeto. A folga excessiva da furação nas chicanas e a quebra da chapa de impingimento ou sacrifício da entrada do fluxo elevam o nível de vibração do feixe, provando desgaste localizado dos tubos ou nucleando trincas de fadiga. A figura 2.15 mostra a folga existente entre o furo da chicana e o tubo que resulta em desgaste do tubo.



Figura 2.15 - Detalhes do contato do tubo com a chicana mostrando o desgaste devido a folga excessiva

Fonte: STEWART E ORAN (2012).

Estes danos mecânicos também podem ser detectados no ensaio de correntes parasitas.

2.3 END APLICADOS NA INSPEÇÃO DE FEIXES TUBULARES

Não existe um único ensaio que possa ser utilizado de maneira generalizada para todos os danos e materiais. Como regra geral, os END se complementam, sendo importante identificar suas limitações e vantagens. Dentre as técnicas de END disponíveis para inspeção de tubos podemos citar os ensaios: visual, LP, teste de estanqueidade com hélio, IRIS, campo remoto, MFL e correntes parasitas.

O ensaio visual está normalmente associado ao exame de tubos individuais ou para acompanhar o teste hidrostático, observando o vazamento dos tubos na face do

espelho e nas juntas de vedação. Pode-se também fazer uso de pequenas câmeras e videoscópios que são inseridos dentro do tubo ou do casco, revelando a condição da sua superfície interna.

O ensaio de LP é muito aplicado na inspeção das soldas de selagem/resistência na ligação tubo-espelho visando detectar trincas. As demais soldas dos bocais e do próprio casco também são avaliadas por este ensaio.

O teste de estanqueidade com hélio é de grande utilidade quando se deseja localizar pequenos e micros vazamentos. Normalmente é realizado um teste global de todo o permutador, sendo este um exame rápido. Se forem detectadas fugas neste exame geral, cada tubo e sua solda com espelho são testados individualmente. Com esta técnica de ensaio podemos encontrar vazamentos menores do que os encontrados com outros processos de teste. Porém, estes testes não identificam o tipo de dano, sua localização no tubo e se limitam a detecção de tubos com danos passantes.

Para os demais END é necessário selecionar uma técnica que dependerá das características do material do tubo e condições operacionais, mecanismos de danos esperados e o tipo de defeito (BIRRING, 1999). Esta seleção é fundamental para a efetividade da inspeção. Veremos a seguir as principais características destes ensaios, vantagens e limitações, dando ênfase para o ensaio de correntes parasitas no item 2.3.4.

2.3.1 Sistema de Inspeção Interna Rotativa (*IRIS-Internal Rotary Inspection System*)

A técnica IRIS é baseada no princípio de medição de espessura por ondas de ultrassom. Consiste basicamente na varredura circunferencial total ao longo do tubo por um feixe normal de ultrassom. Isto se dá pela rotação de um pequeno espelho (a 45° do eixo longitudinal) que é acionada por uma turbina movida a água. O espelho reflete o feixe ultrassônico em direção radial à medida que gira dentro do tubo, conforme ilustra a figura 2.16 (SADEK, 2006, BIRRING, 1999).

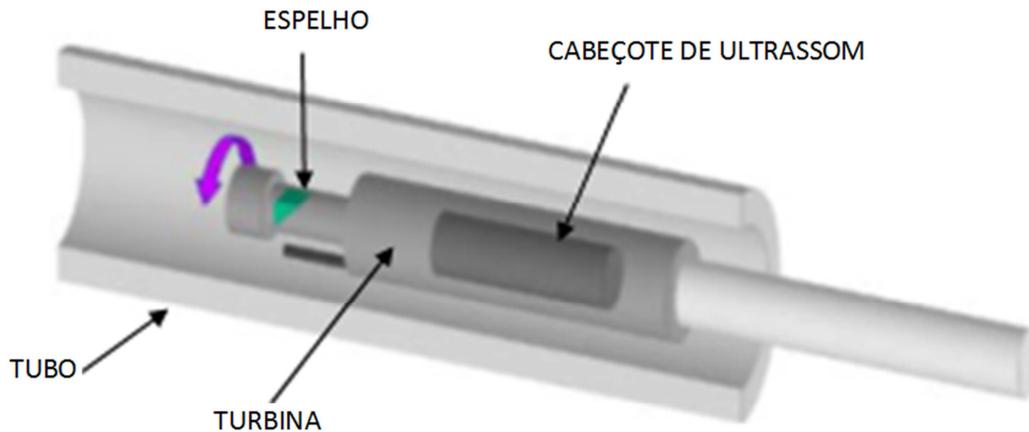


Figura 2.16 - Detalhes dos componentes no ensaio IRIS

Fonte: ARAÚJO E SILVA (2009).

A sonda IRIS varre toda a circunferência do tubo, uma vez que é puxado para fora do tubo. No visor do aparelho de IRIS é possível observar a seção transversal B-Scan e C-Scan do tubo, conforme mostrado na figura 2.17 (ARAÚJO, SILVA, 2009).

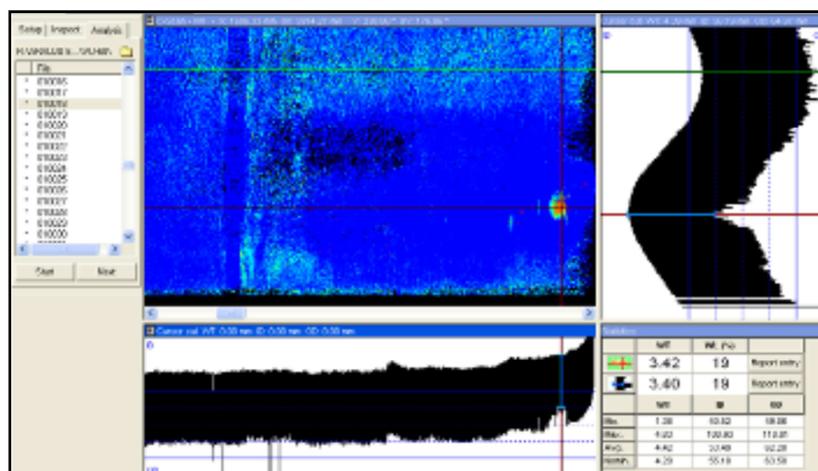


Figura 2.17 - Representação gráfica B, C-Scan

Fonte: ARAÚJO E SILVA (2009).

O método IRIS pode ser aplicado a todo tipo de material, sendo este ferromagnético ou não ferromagnético. O método é muito preciso na medição de espessura, bem como na detecção e identificação de pites internos e externos com

diâmetros maiores de 3 mm. Entretanto não detecta trincas e pites com pequenos diâmetros (BIRRING, 1999).

2.3.2 Campo Remoto (RFT- *Remote Field Testing*)

A técnica de Campo Remoto se baseia na transmissão de um campo eletromagnético através do material do tubo, podendo ser visualizada na figura 2.18. Neste ensaio são utilizadas sondas que emitem um campo magnético que é atenuado pelo volume do material existente entre a bobina emissora e a receptora. Uma correlação entre a intensidade do campo magnético sentido e a espessura do tubo (plano de voltagem) é a base para a detecção e dimensionamento da espessura real dos tubos (SADEK, 2006, BIRRING, 1999).

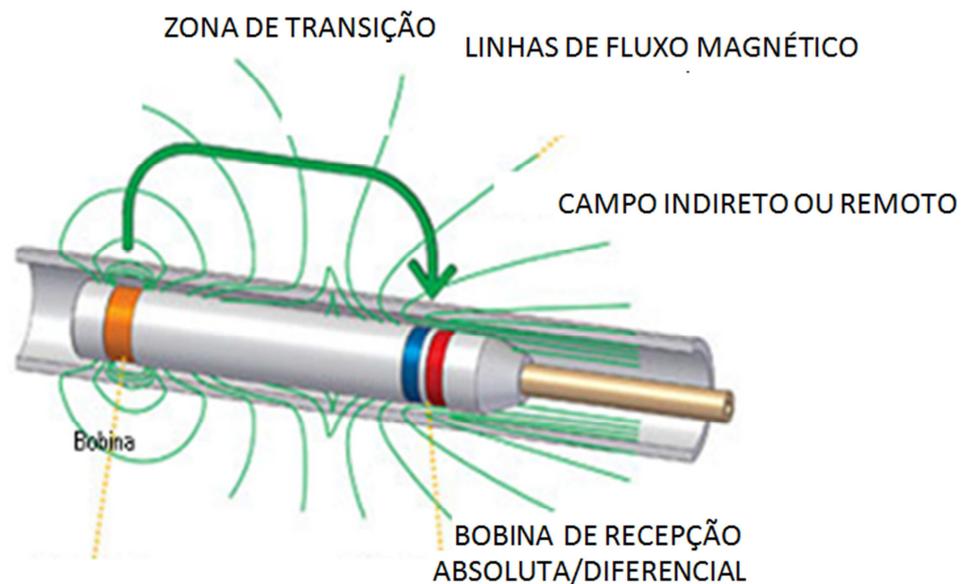


Figura 2.18 - Componentes do ensaio de campo remoto

Fonte: ARAÚJO E SILVA (2009).

O ensaio de campo remoto apresenta as vantagens de inspecionar tubos parcialmente incrustados, possuir sondas flexíveis para a inspeção de trechos curvos e uma velocidade de ensaio superior ao IRIS. No entanto, apresenta as desvantagens de ser aplicado apenas em materiais magnéticos, não detectar danos sob chicanas e espelho. Além destas, possui limitações para detectar pequenos danos. A execução e

interpretação dos resultados exigem habilidade e experiência do inspetor (BIRRING, 1999, ASM, 1989).

2.3.3 Vazamento de fluxo magnético (MFL - *Magnetic Flux Leakage*)

A técnica de vazamento de fluxo magnético ou MFL baseia-se na influência dos defeitos sobre um campo magnético e se limita a materiais ferromagnéticos. A representação esquemática do ensaio pode ser visualizada na figura 2.19.

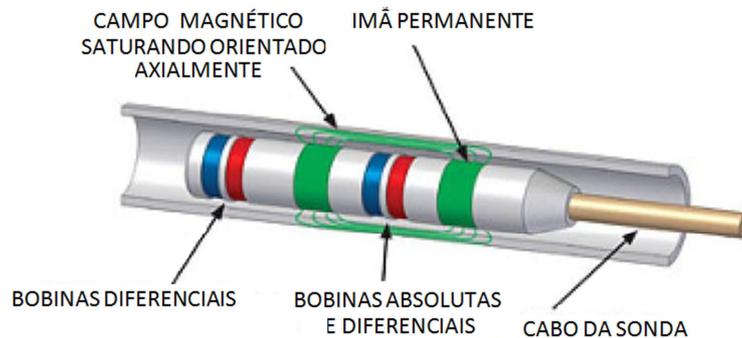


Figura 2.19 - Componentes do ensaio MFL

Fonte: ARAÚJO E SILVA (2009).

A sonda MFL consiste de um ímã, com dois tipos de sensores magnéticos: tipo bobina e elemento *Hall*. O sensor do tipo bobina detecta a taxa de variação do fluxo, enquanto a sonda de tipo *Hall* detecta o fluxo absoluto. A bobina detecta pequenos defeitos que causam perturbações no fluxo.

Defeitos na superfície interna irão produzir sinais mais intensos que os defeitos externos, uma vez que a intensidade do campo é maior na superfície interna do que na externa (BIRRING, 1999).

2.3.4 Correntes parasitas – Princípios do ensaio

O princípio desta técnica está na aplicação de um campo magnético primário, o qual é gerado em uma bobina excitada por uma corrente alternada. Este campo magnético penetra no material a ser testado (condutor elétrico) e gera no mesmo as

correntes parasitas, que por sua vez geram um campo magnético secundário que tem sentido oposto ao campo magnético primário (STEGEMANN, 1990).

O fluxo de correntes parasitas vai depender das características físicas e elétricas do material. Ocorrendo uma irregularidade ou descontinuidade no material, como por exemplo, uma trinca, produzirá uma alteração local das propriedades elétricas e magnéticas do material. Estas alterações locais das correntes parasitas provocarão uma alteração do campo secundário, tornando possível a detecção da trinca, como observado na figura 2.20 (STEGEMANN, 1990).

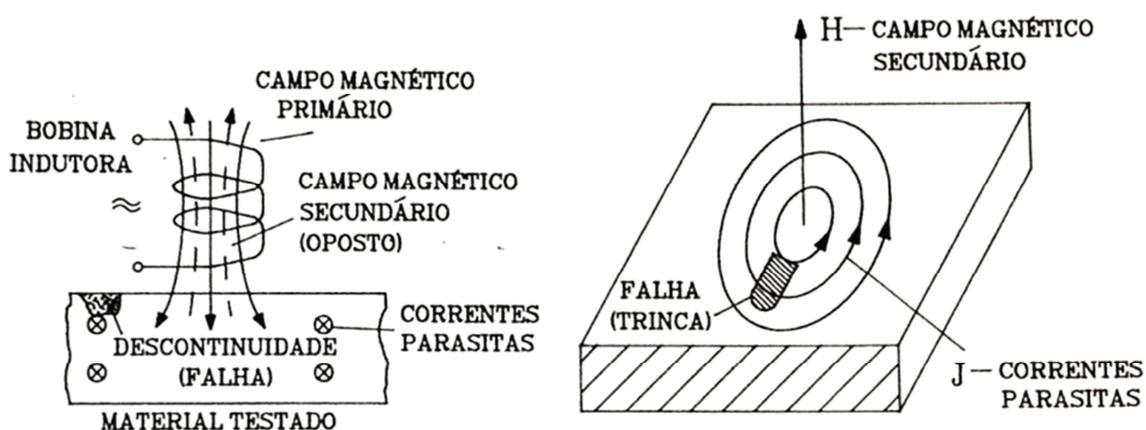


Figura 2.20 - Princípio de funcionamento do método de correntes parasitas

Fonte: STEGEMANN (1990).

As correntes parasitas dependem do campo eletromagnético primário, das propriedades eletromagnéticas da peça em inspeção, da homogeneidade da sua estrutura ou presença de descontinuidades e da aproximação de partes metálicas próximas à peça.

O ensaio de correntes parasitas pode ser usado para uma variedade de aplicações, tais como a detecção de trincas, medição da espessura de metal, detecção de perda de espessura devido à corrosão/erosão, além de determinar a espessura de revestimentos, condutividade elétrica e de permeabilidade magnética. Este ensaio é um excelente método para a detecção de defeitos de superfície e próximo da superfície, quando a localização provável do defeito e sua orientação já são conhecidas.

O ensaio é muito utilizado para detectar a erosão, corrosão, trincas e outras alterações em tubos de permutadores de calor, apresentando uma série de vantagens em

relação aos demais END. Esta aplicação será mais bem explicada no item 3.3 mais adiante.

2.3.4.1 Plano complexo de impedância e a representação do sinal de medição

A oposição total que um circuito oferece ao fluxo de uma corrente elétrica variável no tempo é conhecida como impedância elétrica (Z), que é medida em ohms. Ela é expressa como um número complexo cuja parte real equivale a componente resistiva R e a imaginária é dada pela reatância capacitiva X_C e indutiva X_L . Em uma sonda formada por uma única bobina a influência da reatância capacitiva é desprezível restando somente a reatância indutiva para compor a parte complexa da impedância (NDT, 2012). O ângulo que determina a direção da impedância é conhecido como ângulo de fase (ângulo entre as componentes da voltagem e da corrente elétrica), como mostrado na figura 2.21.

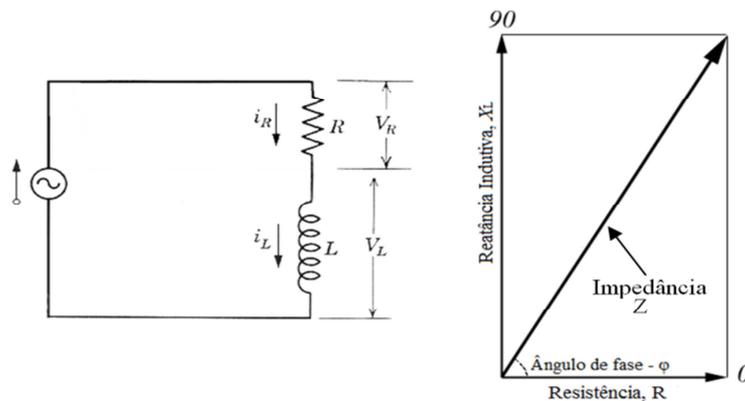


Figura 2.21 - Plano complexo de impedância

Fonte: NDT (2012).

A amplitude da resistência (V_R) está em fase com a corrente, e a amplitude do indutor (V_L) está defasada 90° . Para chegar ao valor total da tensão (V_T) soma-se vetorialmente as tensões V_R e V_L . A relação entre a impedância e os seus componentes pode ser representada por um vetor (conforme figura 2.21), onde a amplitude da impedância em uma sonda de correntes parasitas é o módulo deste vetor e pode ser calculada a partir das equações 2.3 e 2.4.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

$$X_L = 2\pi fL \quad \text{Eq. (2.4)}$$

onde : $f = \text{frequência de operação} - [\text{Hz}]$

$L = \text{indutância} - [\text{H}]$

A impedância é uma grandeza, cuja apresentação está associada a um módulo e a um ângulo de fase. Assim, toda mudança de impedância é acompanhada de uma mudança na amplitude e na fase do sinal, e a mudança na fase traz também informações sobre as condições do material. Se uma variação de impedância puder ser analisada em termos do módulo dessa variação e da mudança de fase, um maior número de informações poderá ser obtido sobre o material inspecionado. A técnica de análise de fase é fundamentada nos diagramas de plano de impedâncias, onde se observam os efeitos das variações de condutividade, da distância sonda-amostra (*lift-off*), da frequência e de espessura do material. Estes efeitos serão detalhados a seguir.

2.3.4.2 Propriedades que afetam as correntes parasitas

Como já mencionado, o fluxo das correntes parasitas pode sofrer influência de algumas propriedades do material como: condutividade elétrica, permeabilidade magnética, dimensões do material testado e frequência. Elas serão individualizadas a seguir.

- **Condutividade Elétrica**

A condutividade elétrica é a facilidade com que os elétrons podem se deslocar dentro de um determinado material e é inversamente proporcional a sua resistividade (ρ). Na inspeção de correntes parasitas a condutividade é expressa como percentual do *International Annealed Copper Standard* (%IACS). No sistema IACS o valor da condutividade do cobre puro recozido e na temperatura de 20°C é arbitrado em 100%

IACS e tomado como padrão. A condutividade de um material pode ser calculada partindo de sua resistividade, de acordo com a equação 2.5:

$$\sigma = \frac{172}{\rho} \text{ (%IACS)} \quad \text{Equação 2.5}$$

onde : $\sigma = \text{condutividade}$

$\rho = \text{resistividade}$

O valor da constante 172 da equação 2.5 é devido ao fato de ρ (resistividade do cobre) ser igual a 1,724 $\mu\text{ohm.cm}$. Com isso a condutividade do cobre será:

$$\sigma = \frac{172}{1,724} = 100\% \text{ IACS} \quad \text{Equação 2.6}$$

- Permeabilidade magnética (μ)

A característica principal que distingue os materiais magnéticos dos materiais não magnéticos é a permeabilidade magnética (μ). Esta propriedade mede a facilidade intrínseca de um material conduzir um fluxo magnético. Esse valor é definido como o quociente da densidade de fluxo magnético induzido (B) pela intensidade do campo magnético externo (H). Para o ar e materiais não magnéticos μ (μ_0) é constante, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (Webers/Ampère-metro).

Empregando a permeabilidade relativa consegue-se uma simplificação, ou seja, $\mu_{rel.} = \mu/\mu_0$. No caso dos materiais magnéticos, o fator μ_{rel} pode ser de grande magnitude, enquanto que para os materiais não magnéticos $\mu_{rel.}=1$.

Variações localizadas na intensidade do campo magnético indutor apresentam um grande efeito sobre a impedância da bobina. Essas variações da impedância são as vezes tão grandes quando comparadas com variações provocadas por mudanças na condutividade ou dimensões que mascaram todas as outras variações. Quando a geometria da amostra permite, este efeito pode ser contornado pela magnetização do material até atingir a saturação. Usa-se para isso outra bobina alimentada por corrente

contínua. A saturação magnética efetivamente elimina quaisquer variações do campo magnético residual.

- Frequência do ensaio (f)

As correntes parasitas são fortemente afetadas pela frequência escolhida durante o ensaio. Felizmente, este é um parâmetro que pode ser controlado. A frequência escolhida determina a profundidade de penetração do campo magnético no material testado e a profundidade de penetração. Como pode ser observado na figura 2.22, a medida que a frequência aumenta de 200 Hz para 10 kHz a profundidade diminui e a distribuição fica mais concentrada na superfície do material.

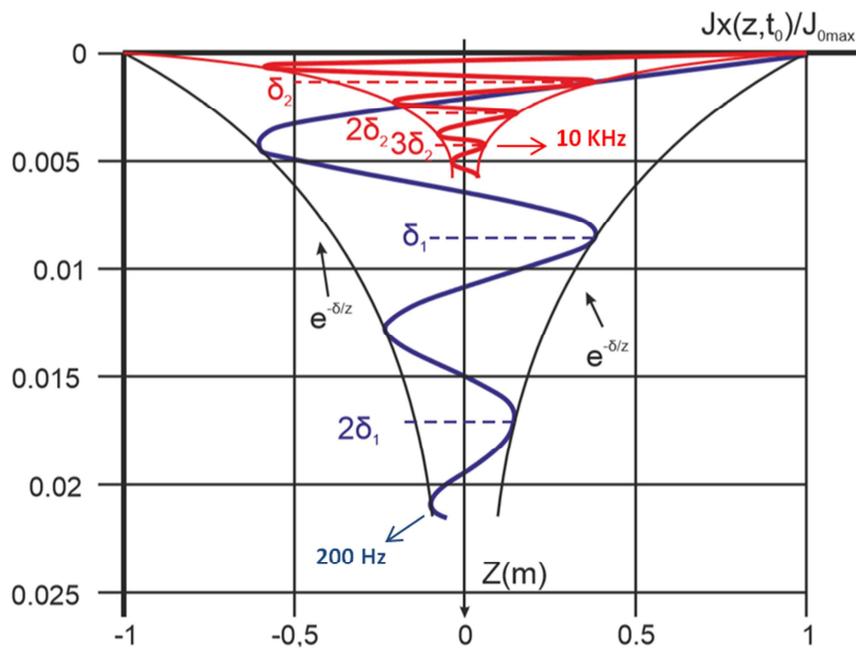


Figura 2.22 - Profundidade de penetração para a frequência de 200 Hz e de 10 kHz

Fonte: GARCIA, GÓMEZ E VÁSQUEZ (2011).

A figura 2.23 a seguir mostra esquematicamente a variação da impedância com as propriedades magnéticas, com o afastamento sonda-peça (*lift-off*) e com a presença da descontinuidade. Se o circuito de corrente de parasitas for balanceado no ar e em seguida colocado sobre uma peça de alumínio ocorrerá num aumento da resistência e

uma redução da reatância indutiva do componente. O aumento da resistência é devido a geração de correntes parasitas no alumínio, que leva esta energia para a bobina e que se traduz como resistência. A redução da reatância indutiva é devido ao campo magnético criado pelas correntes parasitas, que se opõe ao campo magnético da bobina, gerando um campo magnético mais fraco para produzir indutância. Se uma trinca estiver presente no material serão induzidas menos correntes parasitas, que resultará numa redução da resistência e em um aumento da reatância indutiva.

A alteração na condutividade causará mudanças no sinal das correntes parasitas de uma maneira diferente. Quando uma sonda é colocada em um material magnético, tal como aço, terá um comportamento diferente. Assim como com alumínio, o aço é condutor, mas é não magnético. A geração de correntes parasitas retira energia da bobina que se traduz em um aumento na resistência da bobina. Assim como no alumínio, as correntes parasitas geram seu próprio campo magnético que se opõe ao campo magnético da bobina. No entanto, notamos que no diagrama a reatância aumenta. Isto é porque a permeabilidade magnética do aço concentra o campo magnético da bobina. Este aumento da intensidade do campo magnético da bobina reduz o efeito do campo magnético das correntes parasitas. A presença de uma trinca ou uma mudança na condutividade irá produzir uma alteração no sinal das correntes parasitas semelhante ao observado com o alumínio (NDT- 2012).

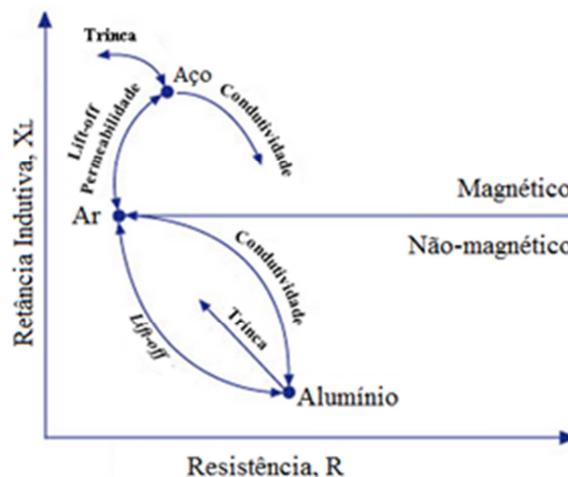


Figura 2.23 - Variação da impedância a partir das variações das propriedades dos materiais

Fonte: NDT (2012).

- Dimensões do material testado

A profundidade de penetração das correntes parasitas num material depende da condutividade inerente do material (maior condutividade, menor penetração), da frequência de ensaio (menor frequência, maior penetração), e da permeabilidade magnética (maior permeabilidade, menor penetração).

No uso de correntes parasitas, podem ocorrer casos em que o campo magnético gerado não consegue atingir toda a espessura da peça. Nestas condições, a inspeção do material da peça que se situar abaixo de uma dada espessura poderá deixar de detectar discontinuidades importantes. Nos casos em que o objeto ensaiado apresenta espessura muito fina o campo magnético gerado pode ultrapassar toda essa espessura e um aumento na espessura do objeto aparecerá no ensaio como se houvesse um aumento na condutividade elétrica do material.

2.3.4.3 Efeito pelicular (*Skin Effect*)

Como já citado anteriormente, quanto maior a frequência, menor será a profundidade de penetração e maior a densidade das correntes parasitas perto da superfície do material testado. Tal efeito é conhecido como o efeito pelicular (*skin effect*). Este é efeito é muito importante para os ensaios não destrutivos visando à detecção de variação no material e de discontinuidades próximas à superfície. A figura 2.24 mostra a variação da densidade das correntes parasitas em função da profundidade abaixo da superfície de um material condutor.

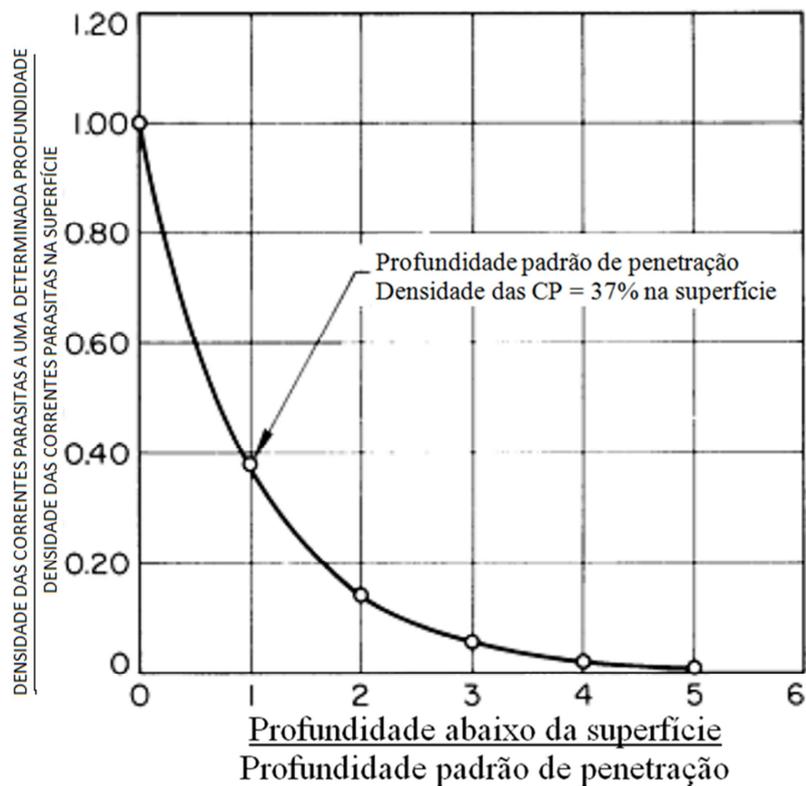


Figura 2.24 - Variação da densidade das correntes parasitas em função da profundidade

Fonte: ASM (1992).

Esta redução da intensidade das correntes parasitas diminui exponencialmente em função da profundidade de penetração, conforme ilustrado na figura 2.25.

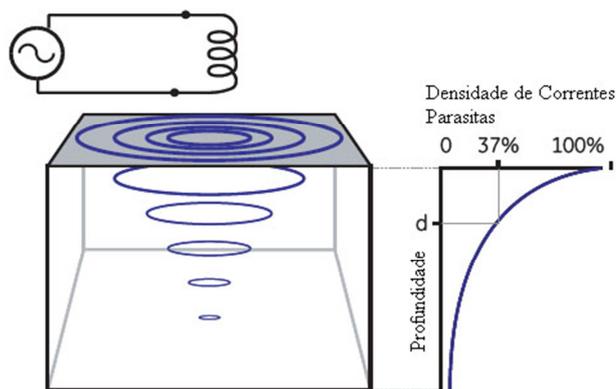


Figura 2.25 - Profundidade de penetração padrão

Fonte: Adaptado de GE (2005).

É conveniente definir uma profundidade de penetração padrão, como sendo a profundidade na qual a densidade das correntes parasitas diminui até 36,8% da densidade superficial, conforme mostrado na figura 2.26. A profundidade de penetração é expressa pela equação 2.7:

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{f \mu_{rel}}} \text{ (mm)}$$

Equação 2.7

onde:

δ – profundidade de penetração

μ_{rel} – permeabilidade relativa

ρ – resistividade elétrica

f – frequência

Para materiais não ferromagnéticos, utiliza-se $\mu_{rel} = 1$. Se for dada a resistividade elétrica, a profundidade de penetração dependerá apenas da frequência. Observa-se que a profundidade diminui com o aumentando da frequência, da condutividade elétrica e da permeabilidade relativa. Esta última propriedade é bastante significativa uma vez que os materiais ferro magnéticos apresentam valores elevados de μ_{rel} , chegando a valores bem pequenos de profundidade com as frequências praticadas pela técnica.

2.3.4.4 Efeito do afastamento sonda peça (*Lift-off*)

O ensaio em um corpo de prova sempre precisa de um movimento relativo entre o material testado e a sonda. Este movimento ocasiona mudanças na distância entre a bobina e a peça (f), devido às irregularidades da superfície, vibrações, etc. Um exemplo de curva *lift-off* é mostrado na figura 2.26.

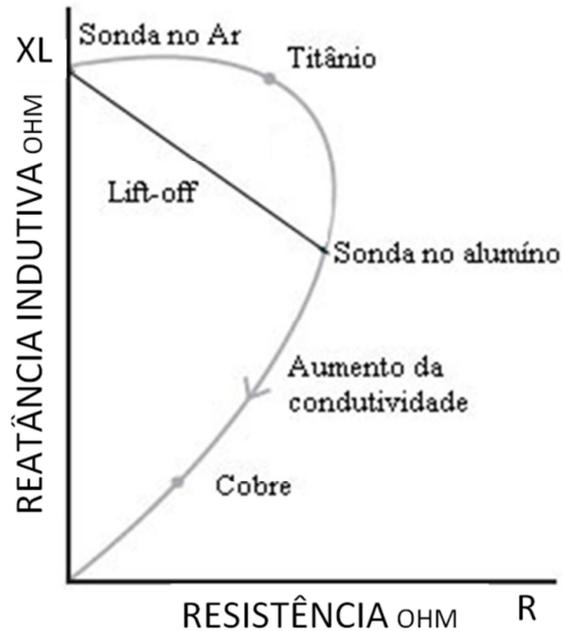


Figura 2.26 - Curva de *lift-off* para uma amostra de alumínio no plano de impedâncias

Fonte: Adaptado de GE (2005)

Assim, é importante saber que influência tem a variação da distância entre a bobina e a peça sobre a apresentação do sinal no plano complexo de impedância. Quanto mais próxima a bobina de uma sonda estiver de uma superfície maior será o efeito sobre a bobina. Na inspeção de componentes cilíndricos este afastamento sonda-peça é denominado fator de enchimento (*fill factor*), que é uma medida do acoplamento entre a sonda e a peça, sendo sempre menor ou igual 1.

2.3.4.5 Padrões de referência e calibração no ensaio de correntes parasitas

No ensaio de correntes parasitas é imprescindível o uso de padrões de referência no ajuste e calibração do equipamento, uma vez que os sinais são afetados por muitas variáveis diferentes e pequenas mudanças na configuração do equipamento podem alterar drasticamente a aparência de um sinal. Tal como acontece com a maioria dos métodos de END, a informação mais útil é obtida quando se compara os resultados de um objeto desconhecido com os resultados de um objeto semelhante, com características e defeitos bem conhecidos.

Para detecção de trincas, corrosão e perdas de espessuras, os padrões de referência são utilizados para ajustar os equipamentos para a produção de um sinal reconhecível. Desta forma, sinais que variam de forma significativa a partir das respostas produzidas pelo padrão de referência devem ser investigados para determinar a fonte do sinal. O padrão de referência deve ser do mesmo material que o objeto em teste. Se isto não for possível ou prático, deve ser de um material que tenha a mesma condutividade elétrica e de permeabilidade magnética. As características dos componentes (a espessura do material, a geometria, etc.) devem ser a mesma no padrão de referência, representando a região de interesse.

Se no padrão de referência forem colocados intencionalmente defeitos, estes devem ser o mais representativo dos defeitos reais do componente de teste. No entanto, trincas e danos de corrosão são frequentemente difíceis e dispendiosas de serem produzidas. Como alternativa, são produzidos defeitos artificiais com usinagem de descarga de elétrons (EDM) e cortes de serras, tentando representar as trincas e furos oriundos das condições de serviço como pites e CST.

2.3.4.6 Principais tipos de sondas

As sondas existentes para o ensaio por correntes parasitas se apresentam em diferentes tipos, formas e tamanhos, contendo diferentes arranjos de bobinas que variam de acordo com o objetivo da inspeção. As configurações das bobinas podem ser divididas em três grupos principais (NDT, 2012), como mostrado na figura 2.27 (a), (b) e (c):

- Sondagens de superfície (figura 2.27 - a): são utilizadas principalmente com o eixo normal à superfície da sonda. Além da configuração básica de bobina do tipo *Pancake*, podem ser incluídas neste grupo as sondagens lápis e sondagens especiais utilizadas em superfícies de furos.
- Sondagens externas ou envolventes (figura 2.27 - b): utilizadas para a linha de controle de produtos tubulares. O produto a ser testado é introduzido dentro de uma bobina circular.
- Sondagens internas (figura 2.27 - c): utilizadas para inspeção em serviço de feixes tubulares de permutadores de calor. A sonda é introduzida no tubo e apresenta bobinas enroladas cujo eixo central está no mesmo eixo do tubo.

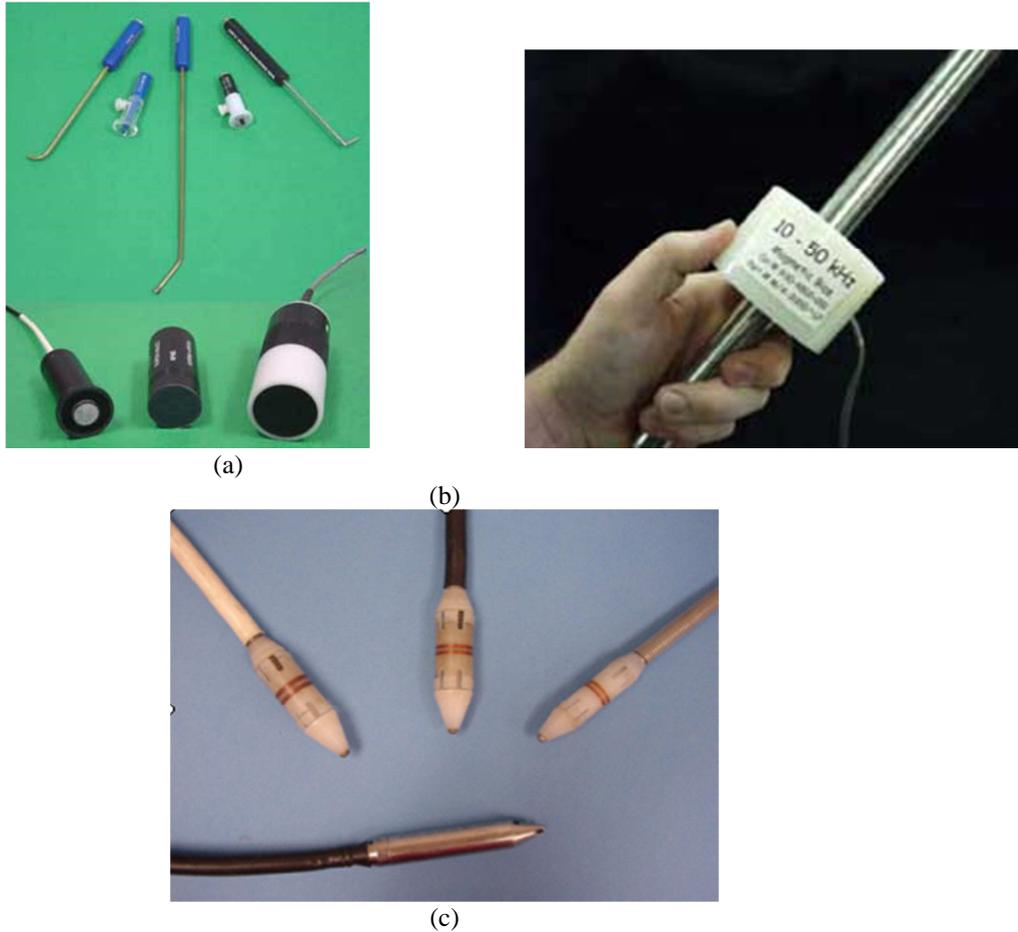


Figura 2.27 - Tipos de sondas (a) de superfície, (b) externa e (c) interna

Fonte: NDT (2012).

As sondas para inspeção de feixes tubulares serão vistas com mais detalhes a seguir.

2.3.5 Ensaios de correntes parasitas em feixes tubulares

O ensaio de correntes parasitas com sondas internas é uma das principais aplicações na inspeção de feixes tubulares de trocadores de calor tubulares. O ensaio é realizado para detectar corrosão e trinca nas superfícies interna e externa, estimando a profundidade dos danos. Este é um aspecto importante do ensaio na medida em que defeitos ainda não passantes podem ser detectados, possibilitando a tomadas de medidas mitigadoras antes de iniciar o vazamento dos tubos.

A detectabilidade depende da interrupção do fluxo de correntes parasitas. Portanto a melhor sonda é aquela que induz a maior densidade de fluxo de corrente

possível na região a ser inspecionada e perpendicular ao defeito. Quando se planeja uma inspeção as seguintes questões devem ser respondidas:

- Que tipo de defeito a inspeção objetiva detectar?
- O material ou componente na proximidade da região a ser inspecionada possui propriedades ferromagnéticas?
- Se trincas forem esperadas, elas possuem alguma direção preferencial?

Estas questões precisam ser avaliadas para poder se decidir qual modelo de sonda, frequência e padrões de calibração são os mais adequados. Uma das etapas mais importante no ensaio de correntes parasitas é a análise dos sinais, infelizmente uma das tarefas mais difíceis e de grande influência para uma inspeção bem sucedida. Como veremos ao longo do trabalho, é possível, com procedimentos qualificados, discriminar sinais de defeitos de falsas indicações e estimar a profundidade e localização do defeito. É necessário um profundo conhecimento dos diagramas de impedância e seus efeitos no atraso das fases, sendo indispensável por vezes alterar as condições do ensaio visando minimizar as variáveis indesejáveis.

2.3.5.1 Sensibilidade das sondas

Existem dois tipos de sondas internas comuns e de uso convencionais comumente chamadas de bobinas: sonda absoluta e sonda diferencial. Se as bobinas forem montadas lado a lado, ambas igualmente sensíveis ao material de teste, a sonda é denominada diferencial. Se apenas uma bobina sente o material de teste e a outra atua apenas como referência, a sonda é absoluta. Para pequenos defeitos localizados as sondas diferenciais são normalmente preferidas.

O campo magnético produzido pela bobina induz um fluxo de correntes parasitas na direção circunferencial. Para detectar uma descontinuidade, a impedância da sonda deve variar. Isto ocorre quando o fluxo de correntes é perturbado. Defeitos circunferenciais paralelos às correntes parasitas não provocam esta distorção, portanto não são detectados. Por esta razão alguns tipos de danos como trincas de fadiga e de CST são de difíceis detecções. Quando as trincas de CST são ramificadas a detectabilidade aumenta. Porém, trincas longitudinais e danos relativamente grandes,

como sulcos de abrasão e alvéolos de corrosão são facilmente detectáveis se forem de um tamanho significativo.

As características dos sinais de correntes parasitas obtidos na inspeção do tubo com uma sonda absoluta são diferentes dos sinais da sonda diferencial. A figura 3.14 ilustra esquematicamente os sinais típicos característicos de alguns tipos de discontinuidades com a sonda absoluta e a diferencial. Observa-se que a sonda absoluta é muito mais sensível a moças e a depósitos de óxidos, que não foram detectados por meio da sonda diferencial

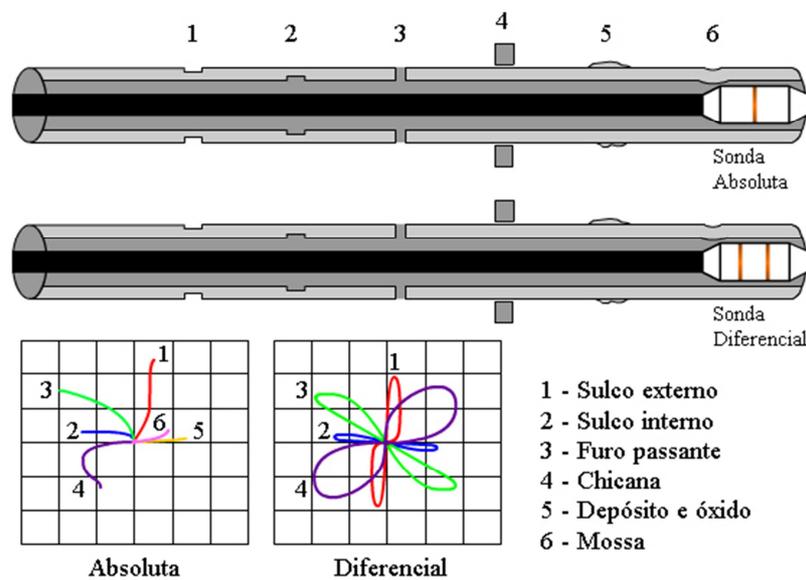


Figura 2.28 - Sinais característicos de defeitos adquiridos com as sondas absoluta e diferencial

Fonte: NDT (2012).

Com a sonda diferencial nenhum sinal será visto no instrumento caso não exista variação na espessura do tubo. Sendo assim, quando um defeito estiver presente, um loop, relativo à primeira bobina da sonda, será gerado no plano da impedância, e quando a segunda bobina passar sobre o mesmo defeito, um segundo loop será produzido, formando um laço típico do sinal diferencial.

A figura 2.29 mostra esquematicamente um tubo ensaiado com sonda bobina mostrando a interação das correntes com trinca na direção longitudinal e circunferencial. As trincas com orientação longitudinal interceptam e perturbam o fluxo de correntes induzidas, alterando a impedância da sonda e sendo, por esta razão,

detectáveis. Por outro lado trincas circunferenciais não distorcem as correntes parasitas, não sendo detectáveis.

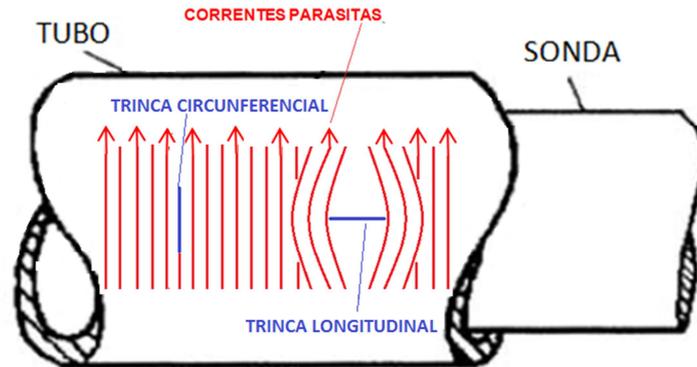


Figura 2.29 - Influência da orientação das descontinuidades na detectabilidade com sonda bobina

Fonte: Adaptado de AECL (1984).

A sonda bobina apresenta a vantagem de serem resistentes a vários efeitos e anomalias como oscilações da sonda, variações de temperatura e variações graduais da condutividade elétrica e do diâmetro do tubo inspecionado. Esta sonda é muito sensível a irregularidades no material como pites, corrosão e desgaste por fricção, tornando-a uma sonda bastante utilizada na inspeção de equipamento em campo. Muito embora seja uma sonda amplamente utilizada, apresenta limitação na detecção de trincas circunferenciais e de defeitos na região RT dentro do espelho (OBRUTSKY *et al.*, 2004, UDPA *et al.*, 2004).

Para detecção de algumas descontinuidades não detectadas pela sonda do tipo bobina podem ser utilizadas as sondas *Pancake* rotativas. Entretanto, estas sondas apresentam baixíssima velocidade de ensaio, aumentando significativamente o custo e o tempo de inspeção (OBRUTSKY *et al.*, 2004, UDPA *et al.*, 2004).

Outros modelos de sonda estão disponíveis e são capazes de detectar descontinuidade circunferenciais. A figura 2.30 mostra modelos de sondas desenvolvidos para esta aplicação. A figura 2.30 (a) ilustra uma sonda superficial conhecida como *Pancake*. A figura 2.30 (b) apresenta outro arranjo, tipo ziguezague. Estes modelos de sonda induzem fluxos de correntes favoravelmente orientados à detecção de descontinuidades circunferenciais. Devem ser usados quando o dano de fadiga ou a CST for um problema conhecido ou suspeitado.

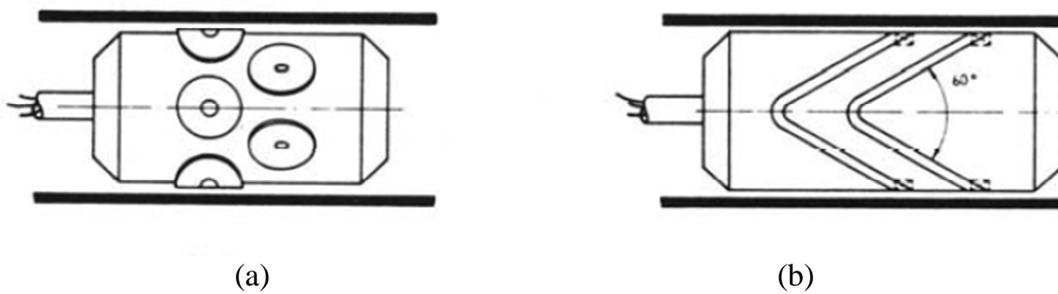


Figura 2.30 - (a) Sonda *Pancake* (b) Sonda ziguezague

Fonte: Adaptado de AECL (1984).

Para obter a sensibilidade adequada para danos na superfície externa do tubo a profundidade de penetração das correntes parasitas deve ser suficiente para se obter uma forte intensidade na superfície exterior. A profundidade de penetração pode ser aumentada através da redução da frequência de teste, porém as dimensões da bobina exibe um efeito maior no campo magnético e conseqüentemente na profundidade de penetração. Nas sondas internas o diâmetro da bobina é controlado pelo diâmetro interno do tubo, podendo-se variar apenas a altura e comprimento do enrolamento. No entanto, o aumento destas variáveis reduz a sensibilidade às pequenas discontinuidades. Para obter o melhor compromisso entre a penetração e a sensibilidade, o comprimento e a espessura da bobina devem ser aproximadamente iguais a espessura do tubo.

A sensibilidade das sondas internas também depende do grau de acoplamento magnético, que é medido pelo fator de enchimento e definido como a razão entre a área média da bobina e a área interna do tubo. Para o máximo de sensibilidade, o fator de enchimento deve ser tão alto quanto possível, compatível com o movimento fácil da sonda no tubo. Note-se que o fator de enchimento nunca pode ser superior a um (100%).

O melhor compromisso entre resolução e amplitude do sinal é obtido quando o comprimento da bobina e a espessura forem iguais a profundidade do defeito. Como regra geral para inspeção de tubos o comprimento da bobina é aproximadamente igual a espessura. Para aumentar a sensibilidade a pequenos defeitos próximos à superfície de contato com a sonda o comprimento e a espessura da bobina podem ser reduzidos. Porém isto resultará numa menor sensibilidade a defeitos externos.

2.3.5.2 Características do sinal do defeito

Um defeito, que perturba ou altera o fluxo de correntes parasitas, muda a impedância da bobina quando esta passa sobre ele. Isto se deve a alteração da trajetória das correntes induzidas, que gera um incremento de resistência devido ao defeito, resultando numa maior resistência total no condutor. A figura 2.31 ilustra esquematicamente a redução da densidade de corrente induzidas quando se afasta da bobina e a distribuição da corrente ao redor de um defeito na parede do tubo, onde:

h = profundidade do defeito, $\Delta\theta$ = largura da região afetada e l = comprimento do defeito.

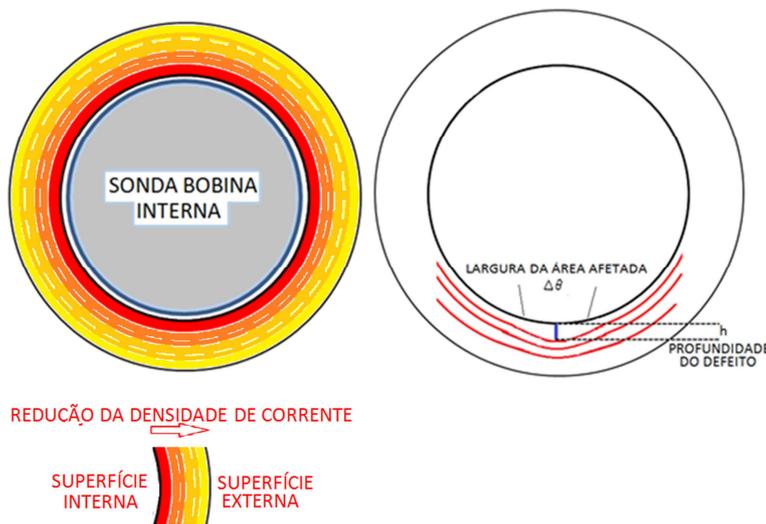


Figura 2.31 - Ilustração esquemática da variação da densidade de corrente e alteração do fluxo em torno do defeito no tubo

Fonte: Adaptado de AECL (1984).

Um maior comprimento do defeito, da sua profundidade e da largura da zona afetada aumenta a resistência ao fluxo de correntes. Isto resulta no aumento da amplitude do sinal que se traduz numa maior detectabilidade.

2.3.5.3 Seleção da frequência de teste

A frequência do ensaio é normalmente a única variável sobre a qual se têm razoável controle durante o ensaio. A escolha da frequência do ensaio depende do tipo de inspeção. Uma vez que é requerido a detecção de defeitos em ambas as superfícies

interna e externa, a frequência de ensaio é escolhida de modo que a espessura do tubo seja menor do que a profundidade da penetração efetiva.

Quando se inspeciona tubos para detecção de defeitos o critério a satisfazer é:

- discriminação de fases entre descontinuidades e outras indicações
- boa separação entre descontinuidades internas e externas

Desta forma a frequência deve ser suficiente para induzir uma alta intensidade de corrente parasita na superfície externa, mas suficientemente baixa para se obter um bom grau de separação de fases entre os sinais a partir de diferentes espessuras. Uma frequência de ensaio normalmente utilizada deve permitir uma separação de aproximadamente 90° (f_{90}) entre os sinais de uma descontinuidade superficial interna rasa de uma descontinuidade superficial externa rasa. De uma forma geral a frequência de teste é dada por $f(90) = 3 \rho / t^2$, onde ρ é a condutividade em microhm-centímetros e t é a espessura de parede em mm.

O diagrama de impedância da figura 2.32 mostra os sinais de um defeito superficial na superfície interna e na superfície externa. Observa-se que o aumento da frequência melhora a separação de fases entre a descontinuidade superficial interna rasa da externa. Porém a amplitude da uma descontinuidade superficial externa rasa diminui em relação à descontinuidade superficial interna rasa.

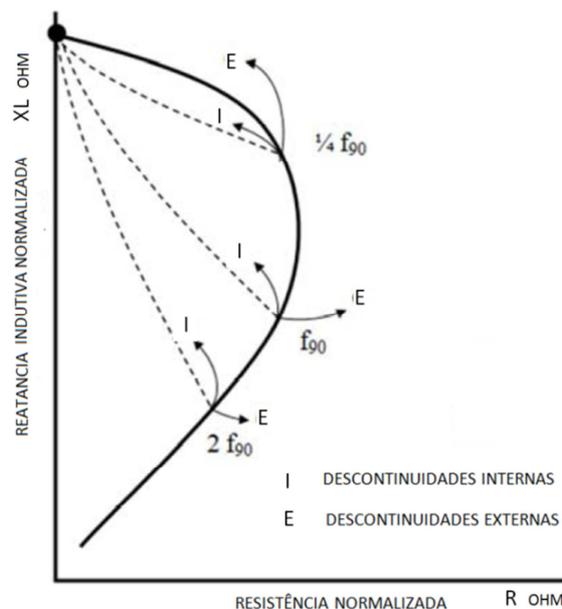


Figura 2.32 - Influência da frequência nos sinais da descontinuidade no diagrama de impedância

Fonte: IAEA (2011)

Na figura 2.33 são mostrados os sinais de uma descontinuidade superficial interna rasa, de uma descontinuidade superficial externa rasa e de um defeito passante na f_{90} . O display foi rotacionado para que os sinais do fator de enchimento e do defeito interno ficassem na horizontal. Nesta situação o defeito externo está a 90° e a indicação do furo passante situado as indicações das descontinuidades internas e externas. Esta configuração permite uma boa discriminação entre os sinais e é a recomendada pelo código ASME para calibração do padrão.

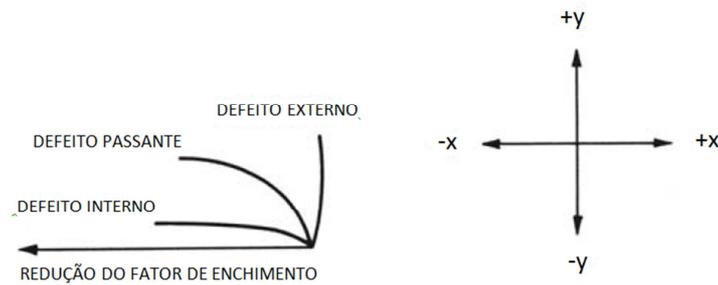


Figura 2.33 - Aparência do sinal na frequência f_{90}

Fonte: IAEA (2011).

Na figura 2.34 observa-se a influência das frequências $f_{90}/4$, f_{90} e $2f_{90}$ na discriminação dos sinais com a sonda absoluta.

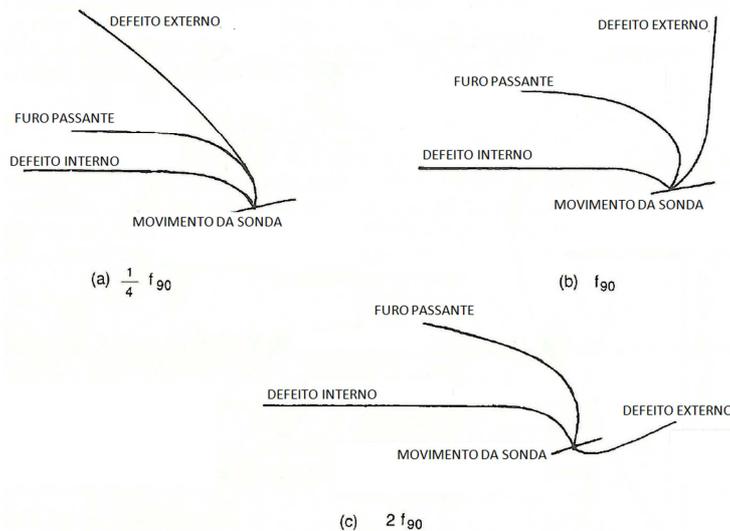


Figura 2.34 - Influência da frequência na discriminação dos sinais

Fonte: IAEA (2011).

Quando se inspeciona um feixe tubular, sinais oriundos de chicanas, amassamentos, depósitos magnéticos e da própria oscilação da sonda estão presentes e precisam ser distinguidos dos sinais das descontinuidades. A figura 2.35 revela esquematicamente estes sinais obtidos com a sonda absoluta e com a diferencial. Sendo assim verifica-se mais uma vez a importância do ajuste na frequência mais adequada para esta discriminação.

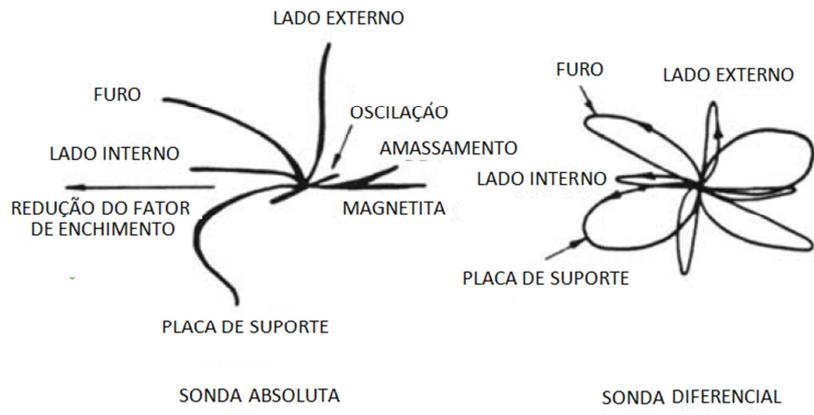


Figura 2.35 - Comparação das características dos sinais nas sondas absolutas e diferenciais

Fonte: IAEA (2011).

2.3.5.4 Calibração com o padrão ASME

A calibração do equipamento de inspeção por correntes parasitas em tubos é executada introduzindo uma sonda diferencial em um padrão confeccionado conforme o Artigo 8, Seção V do código ASME (2008). Este padrão contém defeitos artificiais como furo passante, rebaixos e sulcos externos e internos com diversas profundidades.

A figura 2.36 mostra a calibração do sinal do furo passante, que deve ser ajustado para aproximadamente 40° no sentido anti-horário e deve ter uma diferença de 50° a 120° do sinal do furo simples com 20% de profundidade. A amplitude do sinal é ajustada para 1 V.

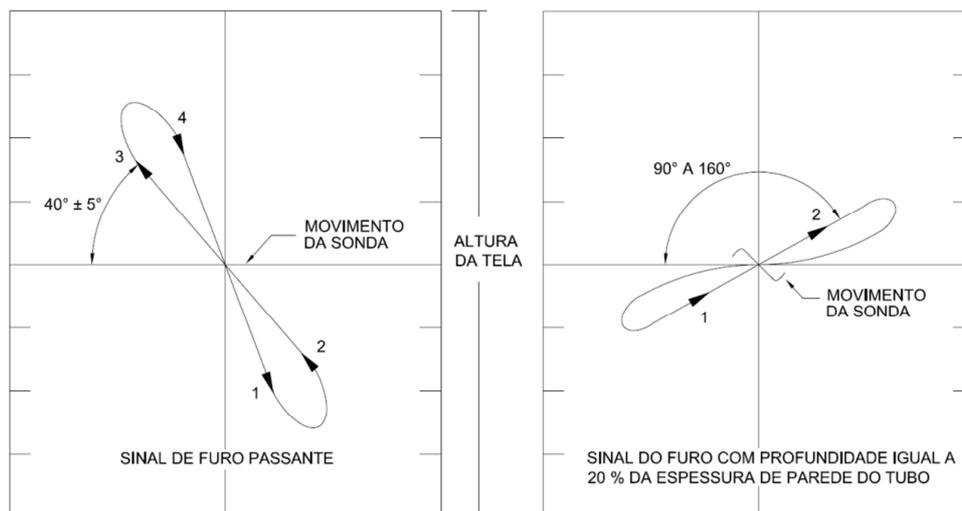


Figura 2.36 - Sinais característicos dos defeitos padrão

Fonte: ABNT (2009).

Para defeitos internos, os ângulos de fase variam de 0° a 40° e são diretamente proporcionais à profundidade. Já os defeitos externos têm ângulos de fase que variam de 40° a 180° e são inversamente proporcionais à profundidade (EPRI, 1999).

O ângulo de fase é alterado sempre que a descontinuidade muda de profundidade. Com isso, a mudança do ângulo de fase pode ser correlacionada à profundidade da descontinuidade e ser analisado por uma curva de calibração. O padrão ASME se mostra indicado para avaliar descontinuidades volumétricas. Outros tipos de descontinuidades necessitam de padrões específicos, como será visto mais adiante.

2.3.5.5 Estimativa da profundidade da descontinuidade

Normalmente a avaliação da profundidade da descontinuidade é realizada através da medição do ângulo de fase do sinal da descontinuidade que é comparado com os obtidos a partir de um padrão de referência adequado. Como mencionado, o padrão normalmente utilizado para inspeção de tubos de trocador é o definido no ASME (2008), cuja calibração resulta em um gráfico correlacionando profundidade da descontinuidade com ângulo de fase do seu sinal. Este padrão contém furos de fundo plano de 20%, 40 %, 60 % e 80 % da espessura da parede do tubo a partir da superfície exterior, e um furo 100% passante.

Se as descontinuidades artificiais do padrão de referência representarem descontinuidades a serem analisadas, os resultados terão uma razoável precisão. No entanto, observa-se que algumas descontinuidades não mostram uma boa correlação entre ângulo de fase e profundidade da descontinuidade quando se utiliza o padrão de referência ASME.

Uma curva típica correlacionando profundidade da descontinuidade e ângulo de fase é mostrado na figura 2.37.

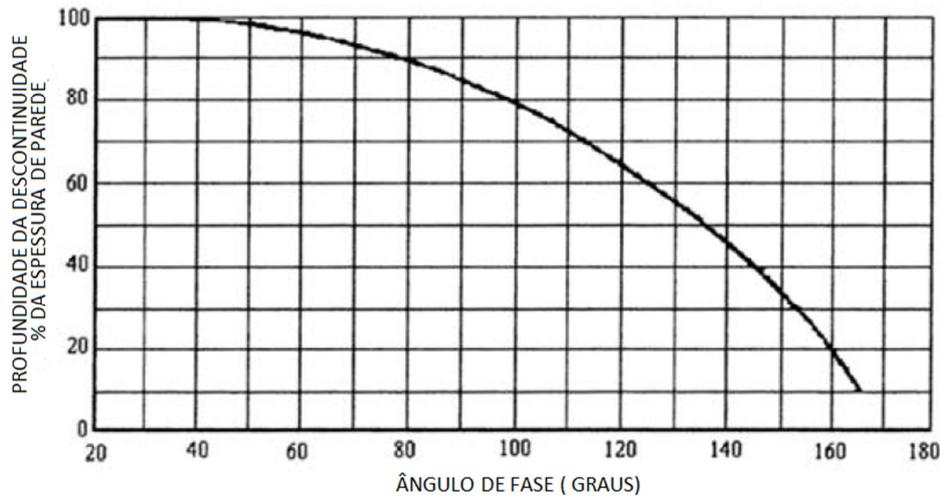


Figura 2.37 - Gráfico mostrando a correlação entre o ângulo de fase do sinal e profundidade

Fonte: IAEA (2011)

A precisão do dimensionamento da profundidade da descontinuidade, correlacionada com o ângulo de fase, aumenta com o aumento da frequência. Sendo a frequência $2f_0$ ideal para estimar o dimensionamento da profundidade da descontinuidade.

Frequências superiores a $2.2f_0$ podem dar maior precisão no dimensionamento, porém o sinal da descontinuidade superficial na superfície externa tende a ficar na horizontal (180°) podendo ser confundido com sinais espúrios como os de amassamentos ou de oscilação da sonda. Deve-se observar também que frequências mais elevadas reduzem a amplitude dos sinais de defeitos na superfície externa. Por esta razão, deve-se tomar cuidado para identificar corretamente os sinais na frequência de detecção f_0 antes de mudar para frequência mais elevadas para avaliação do dimensionamento, por exemplo, $2f_0$. A precisão do dimensionamento aumenta com o

aumento da profundidade da descontinuidade. Isto é vantajoso porque as maiores profundidades de falhas são, obviamente, mais críticas.

Alguns defeitos não mostram uma boa correlação do ângulo de fase e profundidade do defeito utilizando o padrão ASME na calibração. Este é o caso das descontinuidades muito estreitas como o desgaste do tubo sobre suportes e nas barras anti-vibração. Em situações onde for possível correlacionar a amplitude do sinal com a profundidade da descontinuidade, a amplitude poderá ser usada para estimar a profundidade, ao invés do ângulo de fase. Nestes casos pode-se confeccionar um padrão de referência mais adequado, contendo descontinuidades artificiais que simulam o tipo de descontinuidade a ser detectada. A figura 2.38 mostra um gráfico correlacionando a amplitude do sinal com a profundidade da descontinuidade.

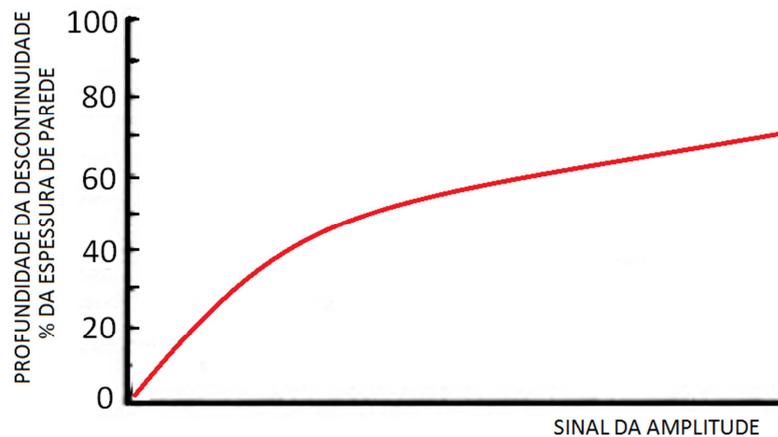


Figura 2.38 - Gráfico mostrando a correlação entre amplitude do sinal e profundidade

Fonte: IAEA (2011)

2.3.5.6 Ensaios de correntes parasitas com multifrequência

O sucesso de uma inspeção de correntes parasitas em serviço depende da sensibilidade das sondas às descontinuidades e da análise dos seus sinais. Ambos os aspectos são igualmente importantes. Alguns sinais de correntes parasitas podem ser confundidos com indicações de defeitos e são chamados de falsas indicações ou sinais anômalos. Eles surgem devido à alta sensibilidade das correntes parasitas a várias variáveis e demonstra a necessidade de analisar criteriosamente antes de concluir que o sinal representa um defeito.

Quando se faz uma varredura com a sonda de correntes parasitas no tubo são adquiridos os sinais das chicanas, dos depósitos magnéticos, dos amassamentos, do espelho, da expansão da mandrilagem, etc., e talvez de defeitos. Deve-se distinguir entre sinais dos defeitos dos sinais insignificantes e ainda o mais importante, estimar a severidade do defeito quando ele ocorre junto com outras fontes de sinais. A interpretação destes sinais seria facilitada se os dados pudessem ser processados para conter apenas o sinal de defeito. O ensaio de correntes parasitas com multifrequência pode realizar esta tarefa.

No ensaio com multifrequência os sinais de excitação de duas ou mais frequências são fornecidos simultaneamente a uma única sonda. O ganho e a fase dos sinais de saída de cada frequência podem ser controlados separadamente. Estes sinais podem ser combinados para eliminar sinais indesejados e deixar apenas o sinal do defeito. Este método é efetivo apenas se o sinal do defeito apresentar características diferentes dos sinais indesejáveis e se os sinais puderem ser vetorialmente somados. Em suma, o ensaio de correntes parasitas com multifrequência permite:

- diferenciar os sinais característicos dos defeitos dos sinais espúrios tais como os originados do depósito de óxido de ferro e de região de expansão do tubo
- possibilidade de utilizar canais para mixagem, o que permite maior confiabilidade na interpretação dos sinais, eliminando a influência dos sinais oriundos dos efeitos geométricos, depósitos, etc.

Em função da sua geometria, da operação de mandrilagem dos tubos e dos tipos de danos em serviço a análise dos sinais de correntes parasitas na região do espelho é de difícil interpretação. Como será visto mais adiante, a utilização de aparelhagem multifrequência e multiparâmetros é essencial para maior efetividade da inspeção de correntes parasitas nesta região

2.3.5.7 Recentes desenvolvimentos na inspeção por correntes parasitas

A degradação de tubos em trocadores de calor devido ao desgaste mecânico ou por corrosão resultam em extensivos reparos e por vezes a substituição de todo o feixe tubular. Dependendo do modelo do permutador estes danos podem inclusive obrigar a troca de todo equipamento.

A variedade de modos de degradação e suas localizações tornam-se um desafio para os inspetores responsáveis em manter a integridade destes equipamentos. A confiabilidade na detecção e dimensionamento destes defeitos é o elemento chave para garantia da eficácia da inspeção. Por esta razão, o ensaio por correntes parasitas vem se desenvolvendo tecnologicamente para que se atinja um maior grau de confiabilidade na inspeção destes tipos de equipamentos.

Até o início dos anos 70, o ensaio de correntes parasitas aplicado na inspeção de tubos de troca térmica utilizava uma única frequência e sondas tipo bobinas, que se mostraram adequados na detecção de defeitos volumétricos. Por volta dos 80, modos adicionais de degradação interna ou externa, tais como corrosão por pites e trincas por CST tiveram que ser tratadas. Um elevado número de falhas associadas a estes mecanismos refletia a limitação da técnica naquele momento. A necessidade de detecção e caracterização rápida destes diversos defeitos motivou o desenvolvimento nos anos 90 de novos sistemas de inspeção, com base em avançada tecnologia de sondas e de equipamentos computadorizados (OBRUTSKY *et al.*, 2009).

Neste contexto, ocorreu uma grande evolução na aparelhagem do ensaio de correntes parasitas, partindo dos instrumentos simples de uma única frequência para aparelhos com multifrequências com sistemas assistidos por computadores. Com isso, foi possível aumentar a confiabilidade e a abrangência na detecção por correntes parasitas, ainda que com aumento dos custos e maior complexidade do ensaio. Apesar de todas as vantagens com a utilização da multifrequência, persistem ainda algumas dificuldades e limitações na detecção de defeitos na RT, uma vez que os sinais do defeito e da oscilação da sonda apresentam ângulos de fase similares em todas as frequências (CECCO, SHARP, 1989).

Mesmo com todo avanço na instrumentação, ainda permanecem as incertezas de inspeção que estão relacionadas principalmente a dois aspectos:

- capacidade de detecção de falhas
- precisão do dimensionamento da falha.

A capacidade de detecção de uma falha pode ser caracterizada em termos da probabilidade de detecção (POD), que é definida como a probabilidade em que a sonda detecta uma falha de determinado tipo e dimensão. Já a precisão no dimensionamento pode ser quantificada utilizando os valores verdadeiros versus medidos, com

características estruturais de interesse, tais como o comprimento e a profundidade do defeito (KUPPERMAN *et al.*, 2002).

Além do comprimento e profundidade, outro parâmetro que deve ser levado em consideração na caracterização do defeito é o seu ângulo de orientação. Com uma sonda do tipo bobina é possível detectar apenas trincas longitudinais, e, para identificar trincas circunferenciais (típicas de CST) é necessário utilizar as sondas rotativas com bobinas do tipo *Pancake*. No entanto, esta última configuração trata de um procedimento lento e caro. Numa tentativa de eliminar as dificuldades citadas acima, foram desenvolvidas sondas do tipo *Array* contendo bobinas no formato transmissor/receptor (T/R). Com este tipo de sonda foi possível atingir desempenho equivalente às sondas rotativas, com a velocidade comparável da sonda bobina. A sonda *Array* opera com quatro frequências simultâneas e combina as unidades de detecção de defeitos circunferenciais e axiais em uma única sonda, para a detecção de todos os modos de degradação e defeitos em um único passe (OBRUTSKY *et al.*, 2004).

A Atomic Energy of Canada Limited (AECL) tem fomentado o desenvolvimento de sondas *Array* T/R para ser utilizada com única varredura e ajudar na resolução de problemas de detecção nas áreas críticas como as RT de mandrilagem dentro do espelho, interseções suporte/tubos, etc.. Estes modelos de sondas possuem fortes propriedades direcionais que permitem melhorar a detecção para trincas circunferenciais ou longitudinal, além de um melhor desempenho na presença da variável *lift-off* em comparação com sondas de impedância. Além disso, o recurso combinado com os dados do display C-Scan fornecem imagens que podem ajudar a caracterizar os modos de degradação e definir a morfologia da falha (OBRUTSKY *et al.*, 2009).

Como as sondas T/R possuem propriedades direcionais, o projeto das sondas é otimizado para maximizar a resposta para diferentes orientações da descontinuidade. A figura 2.39 ilustra a área de sensibilidade de uma sonda T/R resultante das simulações computacionais. A máxima resposta da sonda corresponde a variações no campo magnético induzido na região entre a transmissão e recepção de bobinas. Assim, uma sonda com bobinas orientadas circunferencialmente proporcionará a máxima sensibilidade para as descontinuidades orientadas circunferencialmente. A medida que a descontinuidade se desvia desta orientação, a sensibilidade se reduz.

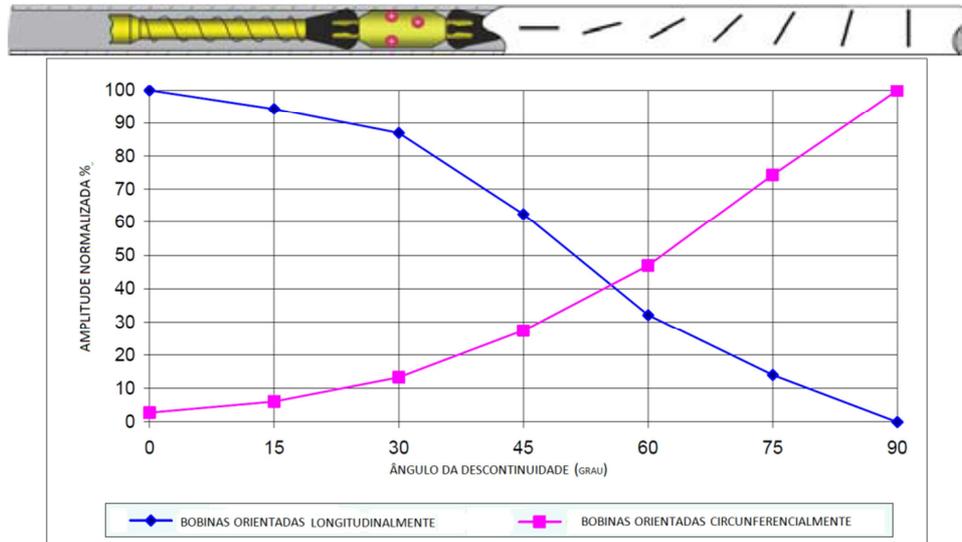


Figura 2. 39 - Efeito do ângulo de falha na capacidade de detecção bobina T/ R

Fonte: OBRUTSKY et al., (2009).

A figura 2.40 (a) ilustra uma sonda T/R para maior sensibilidade das descontinuidades circunferenciais, mostrando a configuração da bobina e áreas de sensibilidade. A figura 2.40 (b) mostra a configuração das bobinas em uma sonda para detecção de descontinuidades longitudinais.

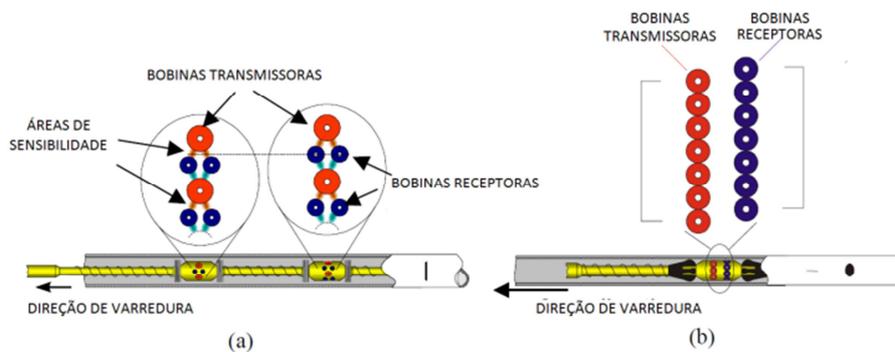


Figura 2.40 - (a) Sonda T/R para detecção de TC (b) sonda T/R para detecção de TL

Fonte: OBRUTSKY et al., (2009).

A figura 2.41 mostra os sinais de um ensaio em tubo de trocador que falhou devido a trincas circunferenciais de fadiga na junção do espelho. Podemos observar que esta descontinuidade só foi detectada no modo circunferencial. Porém, observamos que o dano de desgaste volumétrico foi detectado em ambos os modos (circunferencial e

longitudinal) mostrando que os dados do display C-Scan podem ajudar a caracterizar os modos de degradação e definir a morfologia da falha.

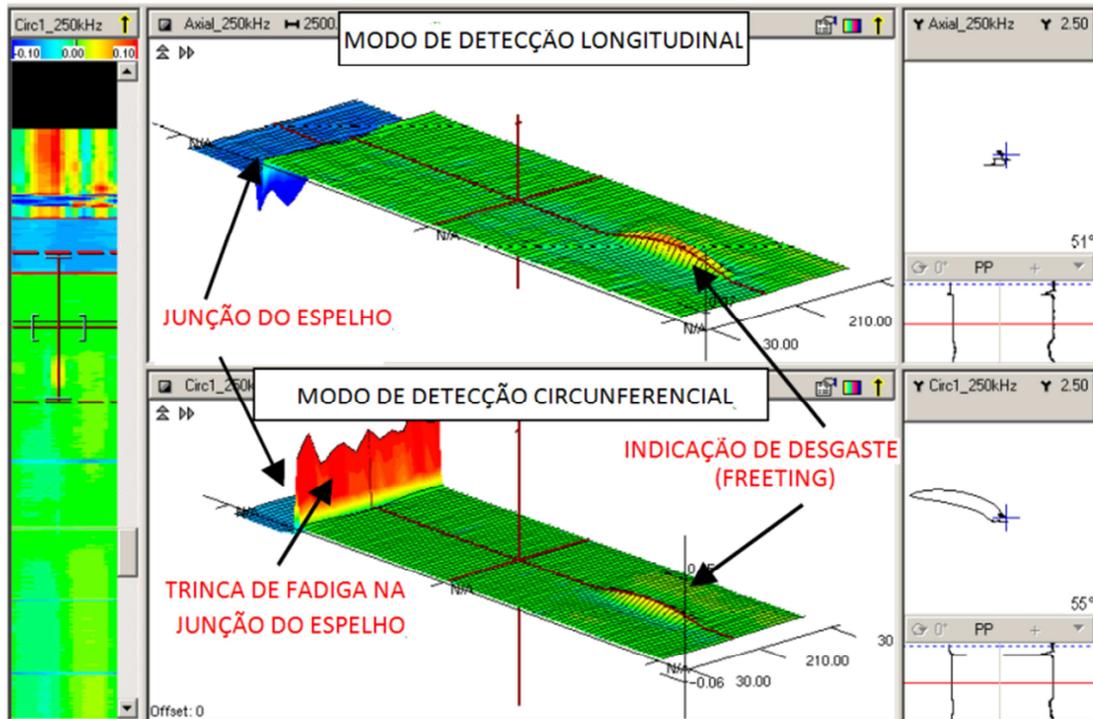


Figura 2.41 - Exemplo de sinais sonda T/R em tubo de Incoloy com trincas de fadiga induzida por vibração excessiva do tubo

Fonte: OBRUTSKY et al., (2009).

Sondas combinando matrizes de sensores *Hall* têm sido desenvolvidas como uma alternativa ao ensaio de correntes parasitas. O objetivo é aumentar a sensibilidade e a resolução para detecção de pequenas descontinuidades, como por exemplo, CST em tubos de trocador de calor. Esta matriz de sensores permite a formação de imagens em torno de defeitos, que podem ajudar a caracterizar os modos de degradação e definir a morfologia do dano.

O princípio do ensaio é a detecção do campo de fuga. Na figura 2.42 podemos visualizar com mais detalhes o princípio da técnica com os dois tipos de fontes magnéticas, mostrando a fuga do campo magnético devido às descontinuidades, em ambas as situações, estático ou dinâmico.

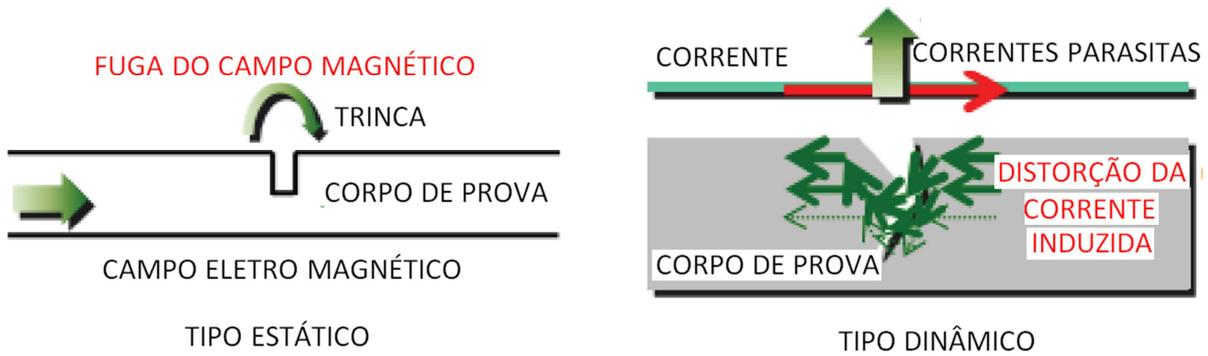


Figura 2.42 - Tipos de fontes magnéticas e princípio do ensaio com sensor *Hall*

Fonte: JINYI LEE et al., (2012).

A Figura 2.43 mostra o diagrama de blocos ilustrando o arranjo utilizado com sensores *Hall* de 32×32 , que são operados por meio de 32 linhas de transmissão e 32 linhas de retorno do sinal.

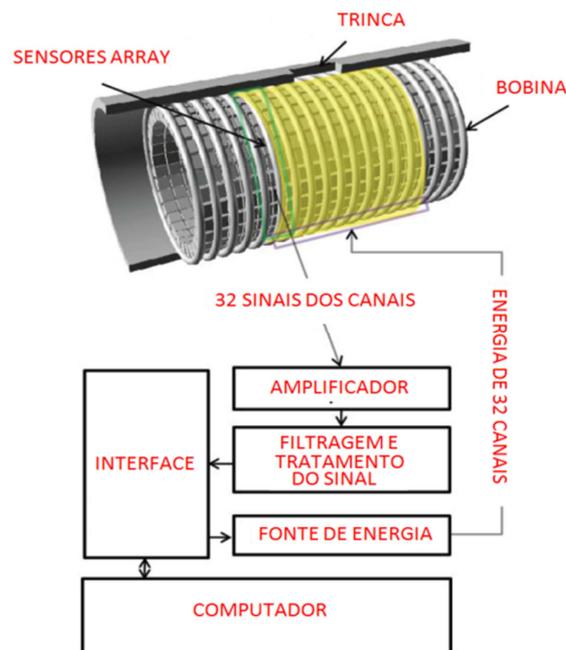


Figura 2.43 - Diagrama de bloco com sensores *Hall*

Fonte: JINYI LEE et al., (2012).

Um dos arranjos apropriados para inspeção de tubos utiliza os sensores numa matriz de 32×32 na forma de um cilindro com um diâmetro de 15 mm, como mostrado na figura 2.44. Este arranjo permitiu uma resolução espacial de 0,78 mm.



Figura 2.44 - Modelo de arranjo cilíndrico para as sondas com sensores *Hall*

Fonte: JINYI LEE et al., (2012).

Para verificar a efetividade da técnica foram realizados ensaios em corpos de prova de liga de cobre contendo descontinuidades internas (circunferenciais) e externas (trincas simulando CST). As trincas de CST com largura na faixa de 1 a 4,6mm e profundidade de 18 a 100% foram detectadas. A técnica se mostra potencialmente interessante em função da alta detectabilidade, boa resolução e possibilidade de detecção de descontinuidades com orientação não favorável. Além dessas vantagens, permitir a visualização da morfologia da descontinuidade através da imagem, ajudando a caracterizar a própria descontinuidade.

Um extenso estudo foi requisitado pela *United States Nuclear Regulatory Commission* (KUPPERMAN *et al.*, 2002), com objetivo de avaliar a confiabilidade dos procedimentos de inspeção por correntes parasitas utilizados na análise da integridade dos geradores de vapor de usinas nucleares. Além de avaliar a confiabilidade o estudo também objetivou levantar as curvas de probabilidade de detecção - PoD (*Probability of Detection*) para os diversos tipos de danos e sua localização. Os tubos foram inspecionados com as sondas dos tipos bobina e *Pancake* rotativa motorizada (KUPPERMAN *et al.*, 2002) visando comparação de resultados. Com base na análise dos dados adquiridos o estudo produziu resultados interessantes em relação à detecção e dimensionamento dos defeitos. Foram levantadas várias curvas de PoD para cada tipo de defeito, dimensão e localização para os 2 tipos de sondas utilizadas. Os resultados mostraram que uma boa PoD só pôde ser conseguida para defeitos mais profundos, conforme mostrado na figura 2.45.

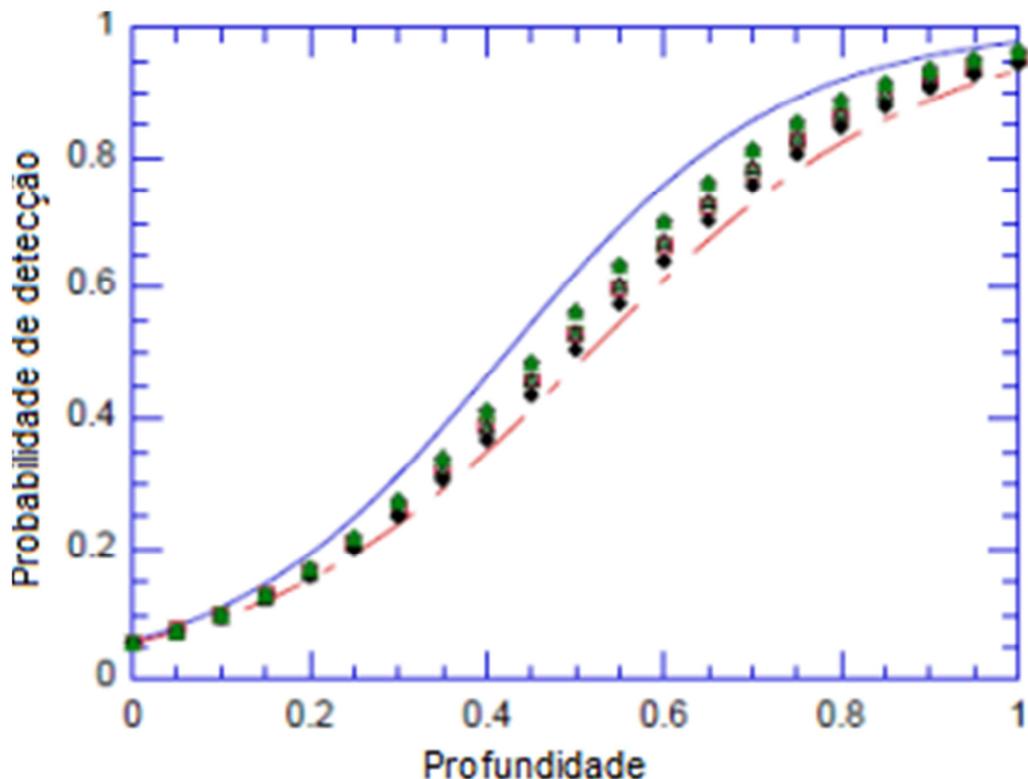


Figura 2.45 – PoD das inspeções realizadas na região tubo-espelho

Fonte: KUPPERMAN et al.,(2002).

O estudo evidenciou a existência de uma grande influência do inspetor sobre a detecção/dimensionamento dos defeitos, do procedimento de inspeção utilizado e da necessidade da construção de padrões mais próximo possível da realidade, considerando os aspectos construtivos e de materiais.

Existem softwares que utilizam algoritmos e fazem um pré-processamento do sinal visando eliminar a influência dos principais fatores de interferência. Por vezes, neste processamento a aplicação baseada na transformada de Fourier não é adequada, gerando uma perda parcial da informação do sinal, sendo necessária utilizar outras filtragens (como a decomposição de wavelet). Pode-se também utilizar um classificador de redes neurais para identificar e estimar os parâmetros do defeito a partir de modelos teóricos e experimentais. Porém, a aplicação desta metodologia não é simples e sua utilização ainda não é sistemática nas inspeções do dia a dia. Um dos softwares conhecido é o PIRATE (*Program for Identification & Recognition of defects through signal Analysis in Testing by Eddy current*) desenvolvidos para garantir detectabilidade,

classificar os defeitos, dimensionar e avaliar criticidade em usinas nucleares (LUNIN *et al.*, 2006).

2.3.5.8 Vantagens do uso do ensaio de correntes parasitas em permutadores

No caso da inspeção de feixes tubulares de trocadores de calor, o ensaio por correntes parasitas apresenta importantes vantagens em relação aos demais, principalmente devido ao alto grau de confiabilidade e rapidez de execução (18 m/min.) (SADEK, 1999). A figura 2.46 ilustra o ensaio de correntes parasitas em um feixe tubular já removido do permutador para inspeção.

Pode-se citar ainda a excelente capacidade de dimensionamento e possibilidade de localização da descontinuidade ao longo do comprimento do tubo, assim como sua posição relativa à espessura do mesmo, informação esta de suma importância para o diagnóstico de determinação do mecanismo de dano. O ensaio também não requer preparação superficial rigorosa e remoção de camadas de tinta.



Figura 2.46 - Esquema de execução do ensaio de correntes parasitas

Fonte: STEWART E ORAN (2012).

A tabela 2.2 resume as aplicações dos END utilizados em tubos de trocadores, relacionando os tipos de defeitos detectáveis, sua localização, materiais, preparo de superfície e as velocidades típicas dos ensaios.

Tabela 2.2 - Aplicações dos ensaios relacionando os tipos de defeitos detectáveis, sua localização, materiais, preparo de superfície e as velocidades típicas dos ensaios.

MATERIAL	DESCONTINUIDADES	ENSAIO	COMENTÁRIOS
NÃO FERROMAGNÉTICOS	pites, trincas, perda de espessura	correntes parasitas convencional	- confiável na detecção - dimensionamento para pit - velocidade máxima de inspeção 1,8 m/s
	tubos aletados	sondas <i>Pancake</i>	- detecta trincas > 50% prof.
	trincas dentro espelho	sonda <i>Pancake</i> rotativa	- confiável, porém lenta
		sonda emissora/receptora	- rápida, porém preço elevado
PARCIALMENTE MAGNÉTICO	pites, trincas, perda de espessura	correntes parasitas com saturação total	- dimensionamento de pites interno não confiável - velocidade máxima de inspeção 1,8 m/s
FERROMAGNÉTICOS	perda de espessura	campo remoto	- apenas perda de espessura - não detecta pites e pin holes - velocidade máxima de inspeção 0,15 m/s
	pites e perda de espessura	fuga de campo magnético	- não dimensiona o defeito - mais sensível para defeitos internos - velocidade máxima de inspeção 0,15 m/s
	perda de espessura	correntes parasitas saturação parcial	- apenas perda de espessura - não detecta pites
TODOS OS MATERIAIS	pites e perda de espessura	us-iris	- confiável na medição de espessura - requer limpeza tubo - não detecta trinca - espessura mínima 1mm para aço C - velocidade máxima de inspeção 0,07 m/s

Fonte: BIRRING (1999).

3- MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as principais características construtivas do simulador do espelho, padrões e corpos de prova confeccionados, da aparelhagem, tipos de sondas e instrumentação utilizada, e da metodologia aplicada para análise dos sinais de correntes parasitas na região do espelho.

3.1 MATERIAIS

Foram confeccionados corpos de prova, padrões e dispositivos em aço inoxidável austenítico AISI 321. A especificação do tubo utilizada para os padrões e corpos de prova foi conforme ASTM A213 TP321. A especificação da chapa utilizada na confecção do espelho foi conforme ASTM A 240 TP 321.

A tabela 3.1 mostra a composição química especificada nas normas e o resultado nos materiais utilizados.

Tabela 3.1 - Composição química dos materiais utilizados

ESPECIFICAÇÃO		%					
		C	Mn	Cr	Ni	Si	Ti
AISI 321	NORMA	0,08	2,00	17/19	9,0/12	1,0 máx.	5x (C+N)
ASTM A213 TP321	RESULTADO	0,043	1,19	17,46	10,22	0,77	0,49
ASTM A240 TP 321	RESULTADO	0,07	0,99	18,1	10,1	0,75	0,41

Fonte: O autor (2013).

Aspectos construtivos e dimensionais do espelho, padrões e corpos de prova confeccionados estão discriminados na listagem a seguir, bem como sua visualização.

a) 01 padrão conforme Norma ASME V, Artigo 8, Apêndice II (ASME 2008), em tubo de aço inoxidável ASTM A213 TP321 no diâmetro de 19,05 x 1,65 x 560 mm, para calibração no ensaio de correntes parasitas. Este padrão, denominado CP 1, contém as seguintes discontinuidades:

- 01 furo 100% passante com diâmetro de 1,3 mm;
- 01 furo cego de fundo plano usinado na superfície externa, com diâmetro de 1,98 mm e profundidade igual a 80 % da espessura;
- 01 furo cego de fundo plano usinado na superfície externa, com diâmetro de 2,80 mm e profundidade igual a 60 % da espessura;
- 01 um furo cego de fundo plano usinado na superfície externa, com diâmetro de 4,76 mm e profundidade igual a 40 % da espessura;
- 04 furos cegos de fundo plano usinados na superfície externa, com diâmetro de 4,80 mm e defasados de 90°, em um mesmo plano perpendicular ao eixo do tubo e com profundidade igual a 20 % da espessura;
- 01 ranhura interna com 1,60 de largura com 10% profundidade.

A figura 3.1 mostra o padrão ASME, sendo possível visualizar as discontinuidades externas de maiores dimensões.



Figura 3.1 - Foto do CP 1 padrão ASME

Fonte: O autor (2013).

b) 01 tubo de aço inoxidável ASTM A213 TP321 no diâmetro de 19,05 x 1,65 espessura de parede x 300 mm de comprimento, isento de descontinuidade, denominado CP2.

c) 01 tubo de aço inoxidável ASTM A213 TP321 no diâmetro de 19,05 x 1,65 espessura de parede x 300 mm de comprimento, isento de descontinuidade, com 02 mandrilagens de encosto, denominado CP3. Desta forma foi possível retirar a folga tubo/furo do

espelho e introduzir as RT entre a RE e a RNE. A figura 3.2 revela as duas RT das mandrilagens na superfície externa do CP 3, inseridas na extremidade esquerda.



Figura 3.2 - Foto do CP 3

Fonte: O autor (2013).

d) 01 espelho em barra redonda de aço inoxidável ASTM A240 TP321, com o diâmetro de 100 mm e 92 mm de comprimento, com 04 furos passantes com diâmetro de 19,25 mm, sendo 02 com ranhuras e 02 sem ranhuras.

A figura 3.3 mostra o desenho construtivo do espelho, com suas dimensões, distância de centro a centro das furações e tolerâncias de fabricação.

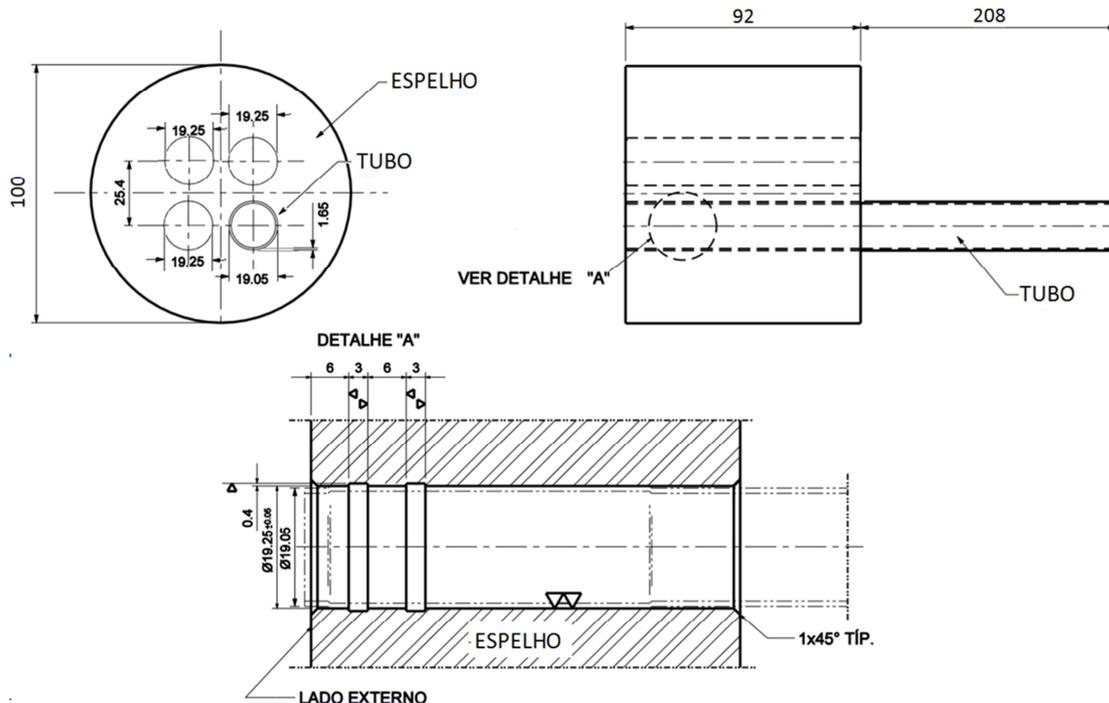


Figura 3.3 - Desenho esquemático do espelho com o CP 4

Fonte: O autor (2013).

Podemos também observar no detalhe a localização e dimensões das 02 ranhuras inseridas em 02 furos do espelho. Os outros 02 furos do espelho são semelhantes, apenas sem as ranhuras. O tubo fixado no espelho, denominado CP4, será detalhado a seguir.

e) 01 tubo de aço inoxidável ASTM A213 TP321 nas dimensões de 19,05 x 1,65 x 300 mm, sem descontinuidade. Este tubo foi inserido em um furo com ranhuras do espelho e realizado uma mandrilagem completa para sua fixação. Este tipo de arranjo simula uma condição real de montagem especificada na norma TEMA. Este tubo, fixo no espelho, foi denominado CP 4.

A figura 3.4 mostra o conjunto do espelho com o CP 4 já fixado.



Figura 3.4 - Foto do CP 4 inserido no espelho

Fonte: O autor (2013).

f) 01 padrão de TL em tubo aço inoxidável ASTM A213 TP321 nas dimensões de 19,05x 1,65x 710 mm, denominado CP 5. Os defeitos simulando trincas foram inseridos por meio de eletro erosão com as seguintes dimensões e profundidades:

- 01 TL 100% com 0,15 mm de largura e 10 mm de comprimento;
- 04 TL com largura de 0,15 mm e comprimento de 10 mm, com profundidades de 20%, 40%, 60% e 80% da espessura (uma trinca de cada dimensão);

A figura 3.5 mostra o CP 5 com as descontinuidades TL 20,40,60 80 e 100%.

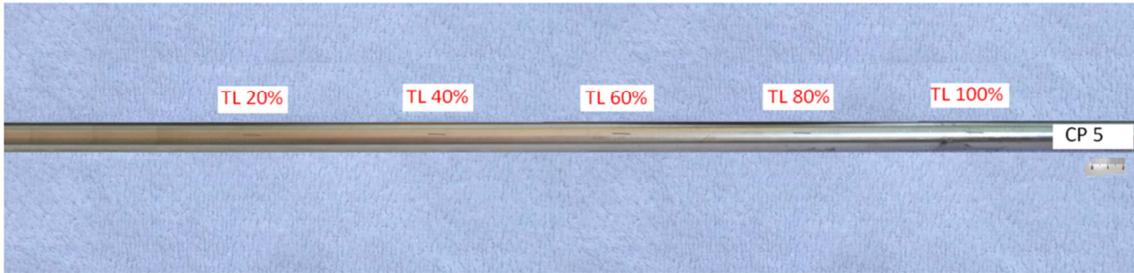


Figura 3.5 - Foto do CP 5 - padrão de TL

Fonte: O autor (2013).

g) 01 padrão de TC em tubo aço inoxidável ASTM A213 TP321 nas dimensões de 19,05 x 1,65 x 660 mm, denominado CP 6. Os defeitos simulando trincas foram inseridos por meio de eletro erosão com as seguintes dimensões e profundidades:

- 01 TC 100% com 0,15 mm de largura e 10 mm de comprimento;
- 04 TC com largura de 0,15 mm e comprimento variável, com profundidades de 20%, 40%, 60% e 80% da espessura (uma trinca de cada dimensão);

A figura 3.6 mostra o CP 6 com as descontinuidades TC 20,40,60,80 e 100%.

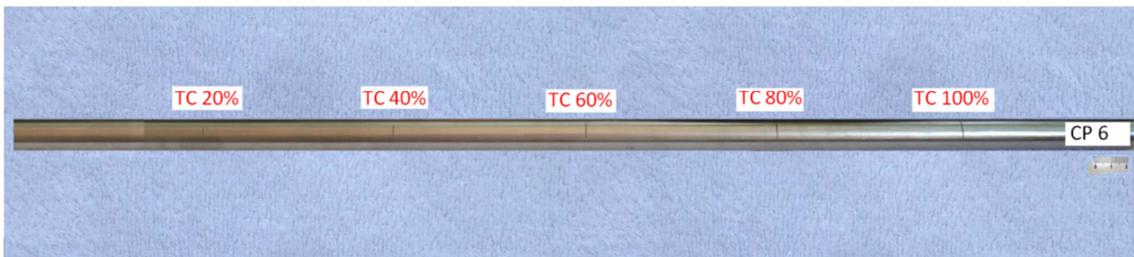


Figura 3.6 - Foto do CP 6 - padrão de TC

Fonte: O autor (2013).

h) Confecção de 06 CP de tubos de aço inoxidável ASTM A213 TP321 no diâmetro de 19,05 x 1,65 de espessura de parede x 300 mm de comprimento. Inicialmente os tubos foram inseridos no furo sem ranhuras do espelho e realizados dois passes de mandrilagem de encosto. Desta forma foi possível retirar a folga tubo/furo do espelho e introduzir as RT entre a RE e a RNE. Esta condição de expansão do tubo permite inserir e remover os corpos de prova no espelho durante os ensaios de correntes parasitas. O objetivo de realizar duas mandrilagem foi permitir a inserção da trinca em uma RT e manter a outra RT original. Desta forma foi possível obter o sinal da trinca na RT e o sinal apenas da RT separadamente.

Após a etapa da mandrilagem de encosto foram inseridos, por meio de eletroerosão, defeitos simulando trincas TL e TC nas RE, RT e RNE. A localização, o tipo de trinca, suas dimensões e profundidades diferem nos corpos de prova, sendo discriminados a seguir:

- 01 corpo de prova com 03 TL 100% com largura de 0,15 mm e 5 mm de comprimento, localizadas RE, na RT e na RNE. Aspectos construtivos deste corpo de prova, denominado CP 7, podem ser visualizados na figura 3.7.



Figura 3.7 - Foto do CP 7 com 03 TL 100% da espessura do tubo

Fonte: O autor (2013).

- 01 corpo de prova com 03 TL 50% com largura de 0,15 mm e 5 mm de comprimento, localizadas na RE, na RT e na RNE. Aspectos construtivos deste corpo de prova, denominado CP 8, podem ser visualizados na figura 3.8. Este CP foi confeccionado após os ensaios com os CP 7 (TL 100%) e CP 9 (TL 20%) e optou-se por inserir a trinca na outra mandrilagem, entre a RT e a RE, para obter os sinais de forma sequencial e facilitar a comparação entre todos os sinais.



Figura 3.8 -Foto do CP 8 com 03 TL 50% da espessura do tubo

Fonte: O autor (2013).

- 01 corpo de prova com 03 TL 20% com largura de 0,15 mm e 5 mm de comprimento, localizadas na RE, na RT e na RNE. Aspectos construtivos deste corpo de prova, denominado CP 9, podem ser visualizados na figura 3.9.



Figura 3.9 - Foto do CP 9 com 03 TL 20% da espessura do tubo

Fonte: O autor (2013).

- 01 corpo de prova com 03 TC 100% com largura de 0,15 mm e 5 mm de comprimento, localizadas na RE, na RT e na RNE. Aspectos construtivos deste corpo de prova, denominado CP 10, podem ser visualizados na figura 3.10.



Figura 3.10 - Foto do CP 10 com 03 TC 100% da espessura do tubo

Fonte: O autor (2013).

- 01 corpo de prova com 03 TC 50% com largura de 0,15 mm e 5 mm de comprimento, localizadas na RE, na RT e na RNE. Aspectos construtivos deste corpo de prova, denominado CP 11, podem ser visualizados na figura 3.11. Este CP foi confeccionado após os ensaios com os CP 10 (TC 100%) e CP 12 (TC 20%) e optou-se por inserir a trinca na outra mandrilagem, entre a RT e a RE, para obter os sinais de forma sequencial e facilitar a comparação entre todos os sinais.



Figura 3.11 - Foto do CP 11 com 03 TC 50% da espessura do tubo

Fonte: O autor (2013).

- 01 corpo de prova com 03 TC 20% com largura de 0,15 mm e 5 mm de comprimento, localizadas na RE, na RT e na RNE. Aspectos construtivos deste corpo de prova, denominado CP 12, podem ser visualizados na figura 3.12.



Figura 3.12 - Foto do CP 12 com 03 TC 20% da espessura do tubo

Fonte: O autor (2013).

Uma descrição simplificada das características dos componentes confeccionados é exibida na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Descrição simplificada da confecção dos corpos de prova

Corpo de prova	Descrição
CP 1	Padrão conforme Norma ASME V, Artigo 8, Apêndice II , 2008
CP 2	Tubo isento de descontinuidade
CP 3	Tubo isento de descontinuidade com 2 mandrilagens de encosto
CP 4	Tubo isento de descontinuidade inserido em um furo com ranhuras do espelho e com uma mandrilagem completa para fixação

Corpo de prova	Descrição
CP-5	Padrão de trincas longitudinais com 5 trincas: - 01 trinca passante com 0,15 mm de largura e 10 mm de comprimento - 04 trincas com largura de 0,15 mm e comprimento de 10 mm, com profundidades de 20%, 40%, 60% e 80% da espessura
CP-6	Padrão de trincas circunferenciais com 5 trincas: - 01 trinca passante com 0,15 mm de largura e 10 mm de comprimento - 04 trincas com largura de 0,15 mm e comprimento variável, com profundidades de 20%, 40%, 60% e 80% da espessura
CP-7	Corpo de prova com 03 trincas longitudinais com 0,15mm de largura e 5 mm de comprimento e 100% profundidade, com a seguinte localização: - 01 na RE - 01 na RT - 01 na RNE
CP 8	Corpo de prova com 03 trincas longitudinais com 0,15mm de largura e 5 mm de comprimento e 50% profundidade, com a seguinte localização: - 01 na RE - 01 na RT - 01 na RNE
CP 9	Corpo de prova com 03 trincas longitudinais com 0,15mm de largura e 5 mm de comprimento 20% profundidade, com a seguinte localização: - 01 na RE - 01 na RT - 01 na RNE
CP 10	Corpo de prova com 03 trincas circunferenciais com 0,15mm de largura e 5 mm de comprimento e 100% profundidade, com a seguinte localização: - 01 na RE - 01 na RT - 01 na RNE
CP11	Corpo de prova com 03 trincas circunferenciais com 0,15mm de largura e 5 mm de comprimento e 50% da espessura de profundidade: - 01 na RE - 01 na RT - 01 na RNE
CP 12	Corpo de prova com 03 trincas circunferenciais com 0,15mm de largura e 5 mm de comprimento e 100% profundidade, com a seguinte localização: - 01 na RE - 01 na RT - 01 na RNE

Fonte: O autor (2013).

3.2 EQUIPAMENTOS E SONDAS

3.2.1 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados utilizado para os ensaios de correntes parasitas foi composto pelo aparelho Olympus Multiscan MS5800 com as seguintes características:

- Até 8 frequências;
- 16 canais absolutos e diferenciais simultâneos;
- Faixa de frequência ajustável de 20 Hz a 6 MHz;
- Suporte para todos os tipos de sondas absolutas, diferenciais, transmissão-recepção e rotativas;
- Softwares para coleta e análise de dados: Multiview e ECT-Opt;

A figura 3.13 ilustra este conjunto, com a vista frontal do aparelho e a tela de visualização do ensaio. Observam-se os vários tipos para entrada do conector e cabos, mostrando sua versatilidade na utilização de diferentes modelos de sondas.



Figura 3.13 - Sistema de aquisição Olympus Multiscan MS5800

Fonte: O autor (2013).

3.2.2 Sondas utilizadas

3.2.2.1 Sonda tipo Bobina

A sonda Bobina utilizada foi do fabricante Olympus, disponibilizada comercialmente no mercado. As principais características são:

Modelo: TEA-140-075-N15

Frequência nominal: 75 kHz média frequência

Faixa de frequência: 15 a 150 kHz

Diâmetro da sonda: 14,0 mm - 0,551

Comprimento do cabo: 15 m

Material: aço inoxidável AISI 304

A figura 3.14 mostra as principais características construtivas e detalhes do arranjo das bobinas, cabeamento e dos pinos de encaixe. Podemos observar no item (e) que esta sonda utiliza um único conector, com apenas 4 pinos e um único cabo.



Figura 3.14 - Principais características da sonda bobina utilizada

Fonte: O autor (2013).

3.2.2.2 Sonda tipo *Pancake*

A sonda *Pancake* combina sensores com arranjos superficiais e as bobinas tradicionais, sendo indicadas para trincas orientadas circunferencialmente. O modelo utilizado foi do fabricante Olympus com as seguintes características:

Modelo: TEC-140-250-N15

Frequência nominal: 250 kHz média frequência

Faixa de frequência: 50 a 500 kHz

Diâmetro da sonda: 14,0 mm - 0,551

Comprimento do cabo: 15 m

Material: aço inoxidável AISI 304

A figura 3.15 mostra suas principais características construtivas e detalhes do arranjo das bobinas, da sonda superficial, do cabeamento e dos pinos de encaixe. Podemos observar (no item e) a presença de 2 conectores e 2 cabos distintos para o arranjo bobina (*Bobbin Coin*) e o arranjo superficial (*A/C Coins*).



Figura 3.15 - Principais características da sonda *Pancake* utilizada

Fonte: O autor (2013).

3.2.2.3 Sonda tipo Array

A cada dia novos modelos e tipos de sonda são desenvolvidos, seja com o intuito de aumentar a sensibilidade das descontinuidades de difícil detecção, de facilitar a interpretação dos sinais ou de reduzir o tempo de inspeção. A sonda *Array* utilizada foi concebida para a detecção de trincas circunferenciais em tubos de aço inoxidável, inclusive sobre suportes e espelho, com velocidade quase igual à velocidade padrão do ensaio de correntes parasitas.

As principais características da sonda estão discriminadas a seguir:

Modelo: TEC-140-250-N15
Frequência nominal: 250 kHz média frequência
Faixa de frequência: 50 a 500 kHz
Diâmetro da sonda: 14,0 mm - 0,551
Comprimento do cabo: 15 m
Material: titânio

A figura 3.16 mostra estas características construtivas e detalhes do arranjo das bobinas emissoras e receptoras, cabos e dos pinos de encaixe.



Figura 3.16 - Principais características da sonda bobina utilizada

Fonte: O autor (2013).

Estas sondas podem usar até 4 frequências com mixagem e apresentar a visualização C-Scan em todas as frequências. Podemos observar no item (e) a presença de um único conector com 41 pinos.

O sistema utilizado, Olympus Multiscan MS5800, software Multiview R6.1 e chave de destravamento do software, são compatíveis com este modelo de sonda. O principal objetivo desta sonda é substituir as sondas *Pancake* rotativas, que requerem mais tempo de inspeção.

3.3 METODOLOGIA

Para avaliar o efeito da presença do espelho, mandrilagem e frestas nos sinais de correntes parasitas os corpos de prova e padrões foram ensaiados nas condições fora e dentro do espelho, com sonda convencional tipo bobina. Este modelo de sonda foi utilizado em toda fase inicial de avaliação nos ensaios de correntes parasitas. As sondas especiais tipo *Pancake* e *Array* foram aplicadas posteriormente, nos limites de detectabilidade da sonda bobina e para complementar a análise dos sinais.

Foram feitas aquisições de sinais de correntes parasitas inicialmente no padrão ASME (CP1 - figura 3.1) fora e dentro do espelho, em um tubo isento de descontinuidades inserido no espelho (CP2), em um tubo sem descontinuidades e contendo duas mandrilagens (CP3 - figura 3.2) e em um tubo sem descontinuidades dentro do espelho, com montagem típica encontradas em trocadores de calor (CP 4 - figura 3.4). O objetivo foi obter e distinguir os sinais oriundos dos efeitos geométricos (espelho e mandrilagens) dos sinais próprios das descontinuidades. Isto permitiu maior confiabilidade na utilização dos recursos de mixagem, disponível no sistema de aquisição de dados com multifrequência e multi parâmetros utilizado. Esta situação é comumente necessária e indispensável na prática, devido à presença de pites e trincas que ocorrem nas regiões de frestas entre os espelhos e os tubos instalados em trocadores de calor.

Foram também obtidos os registros dos sinais do ensaio de correntes parasitas de cada descontinuidade, longitudinais e circunferenciais, inseridas em padrões de trincas (CP 5 e CP 6 - figuras 3.5 e 3.6) e em corpos de prova (CP 7, CP 8, CP 9, CP 10, CP 11 e CP 12 figuras 3.7 a 3.12), fora e dentro do espelho. As descontinuidades foram

inseridas na RE, RT e na RNE. Desta forma foi possível estimar os limites de detecção das descontinuidades longitudinais e circunferenciais em cada região do espelho, utilizando a sonda convencional tipo bobina.

Para complementar a avaliação foram realizados alguns ensaios de correntes parasitas com sondas especiais, tipo *Pancake* e *Array* no padrão ASME (CP1), em padrões de trincas (CP 5 e CP 6) e corpos de prova com TC (CP 10, CP 11 e CP 12), fora e dentro do espelho. O objetivo foi identificar as vantagens e limitações da utilização de cada tipo de sonda, os novos limites de detectabilidade para cada tipo de defeito (longitudinal ou circunferencial) e suas aplicações específicas.

A metodologia aplicada pode ser mais bem entendida acompanhando a sequência cronológica das atividades e ensaios realizados, conforme a seguir:

- 1- Calibração para o ensaio de correntes parasitas utilizando o Padrão ASME (CP 1 figura 3.1) e a sonda convencional tipo bobina, especificada no item 4.2.2.1.
- 2- Ensaio de correntes parasitas no tubo sem descontinuidade (CP 2), inserido no espelho, para avaliar o comportamento dos sinais sob efeito apenas do espelho. Uma parte do tubo ficou fora do espelho para permitir comparar os sinais fora e dentro do espelho.
- 3- Ensaio de correntes parasitas no tubo isento de defeito e com mandrilagens (CP 3 figura 3.2), fora do espelho, para avaliar o comportamento dos sinais sob efeito apenas da mandrilagem.
- 4- Ensaio de correntes parasitas no tubo isento de descontinuidades, fixado por mandrilagem no furo com ranhuras do espelho (CP4). O objetivo foi identificar e avaliar todos os possíveis sinais deste arranjo, que simula um tipo usual de montagem de campo, como a entrada e saída do espelho, a transição da mandrilagem e as ranhuras.

Na figura 3.17 podemos observar o CP 4 já mandrilado e fixado no espelho, pronto para o ensaio.

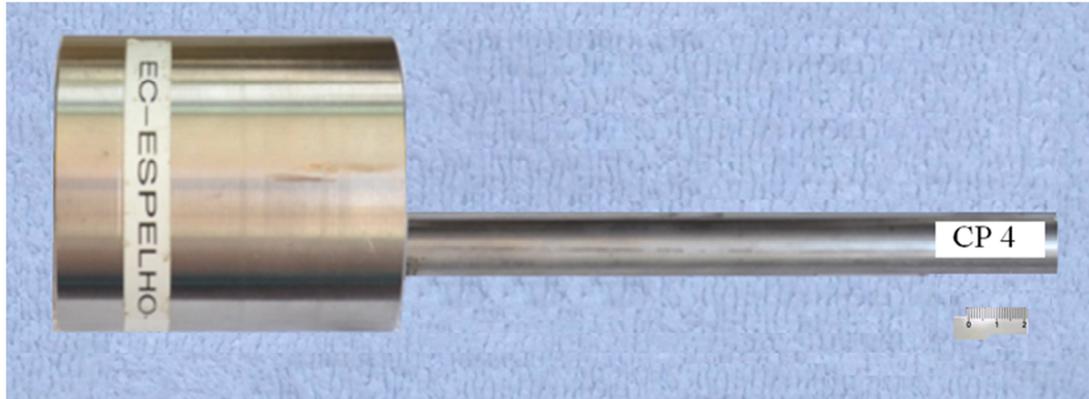


Figura 3.17 - Foto do CP4 fixo no espelho

Fonte: O autor (2013).

5- Ensaio de correntes parasitas no Padrão ASME (CP1), com suas descontinuidades introduzidas individualmente no espelho. Os sinais de cada descontinuidade do padrão ASME obtidos dentro do espelho foi comparado com os sinais obtidos fora do espelho durante a calibração do ensaio, realizado no item 1 acima.

6- Ensaio de correntes parasitas no padrão de TL (CP 5 - figura 3.5) fora do espelho. Posteriormente este CP foi inserido no espelho, posicionando cada trinca sob o espelho e coletando os sinais de correntes parasitas. O sinal de cada trinca do padrão adquirido fora do espelho foi comparado com os sinais obtidos dentro do espelho.

A figura 3.18 mostra o CP5, com a indicação de todas as trincas, destacando a TL 60% posicionada dentro do espelho, pronto para o ensaio. Esta sistemática foi aplicada para as demais profundidades de trincas (20, 40, 80 e 100%).



Figura 3.18 - Padrão de TL (CP 5), com a TL 60% dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

7- Ensaio de correntes parasitas no padrão de TC (CP 6 figura 3.6) fora do espelho. Posteriormente este padrão foi inserido no espelho, posicionando cada trinca sob o mesmo e coletando os sinais de correntes parasitas. O sinal de cada trinca do padrão fora do espelho foi comparado com o obtido dentro do espelho, com a mesma sistemática do item 5 acima.

A figura 3.19 mostra o CP6, com a indicação de todas as trincas, destacando a TC 80% posicionada dentro do espelho, pronto para o ensaio. Esta sistemática foi aplicada para as demais profundidades de trincas (20, 40, 60 e 100%).

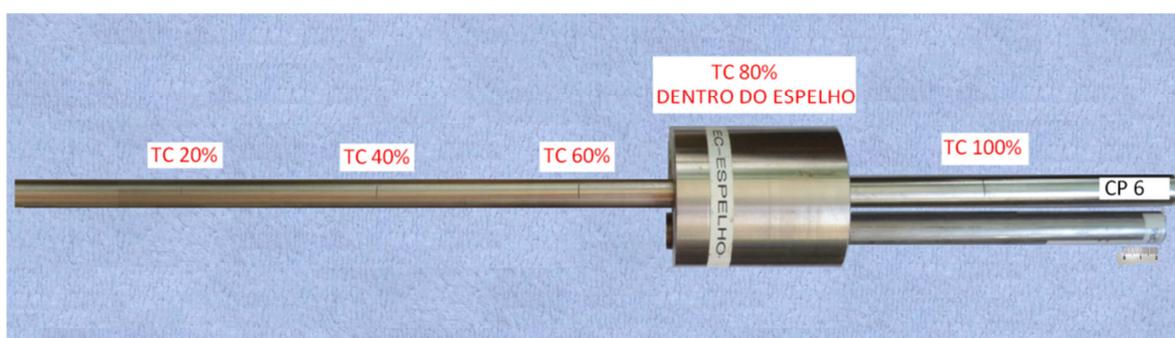


Figura 3.19 - Padrão de TC (CP 6), com a TC 80% dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

8- Ensaio de correntes parasitas no corpo de prova com 03 TL com 100% profundidade (CP 7 - figura 3.7) fora e dentro do espelho. Os sinais de correntes parasitas do CP 7 de cada trinca localizada na RE, RT e RNE fora do espelho foram comparados com os obtidos dentro do espelho. Esta sistemática foi aplicada aos demais corpos de prova (CP 8, CP 9, CP 10, CP 11, CP12).

A figura 3.20 ilustra o CP 7 dentro do espelho, pronto para o ensaio. Observa-se também o CP4, que é fixo ao espelho.



Figura 3.20 - CP7 com trinca TL 100% dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

9- Ensaio de correntes parasitas no corpo de prova com 03 TL com 50% profundidade (CP 8 - figura 3.8) fora e dentro do espelho. Os sinais de correntes parasitas do CP 8 de cada trinca localizada na RE, RT e RNE fora do espelho foram comparados com os obtidos dentro do espelho.

10- Ensaio de correntes parasitas no corpo de prova com 03 TL com 20% profundidade (CP 9 - figura 3.9) fora e dentro do espelho. Os sinais de correntes parasitas do CP 9 de cada trinca localizada na RE, RT e RNE fora do espelho foram comparados com os obtidos dentro do espelho.

11-Ensaio de correntes parasitas no corpo de prova com 03 TC com 100% profundidade (CP 10 - figura 3.10) fora e dentro do espelho. Os sinais de correntes parasitas do CP 10 de cada trinca localizada na RE, RT e RNE fora do espelho foram comparados com os obtidos dentro do espelho.

12-Ensaio de correntes parasitas no corpo de prova com 03 TC com 50% profundidade (CP 11 - figura 3.11) fora e dentro do espelho. Os sinais de correntes parasitas do CP 11 de cada trinca localizada na RE, RT e RNE fora do espelho foram comparados com os obtidos dentro do espelho.

13- Ensaio de correntes parasitas no corpo de prova com 03 TC com 20% profundidade (CP 12 - figura 3.12) fora e dentro do espelho. Os sinais de correntes parasitas do CP 12 de cada trinca localizada na RE, RT e RNE fora do espelho foram comparados com os obtidos dentro do espelho.

Dando continuidade na avaliação da influência do espelho e da mandrilagem nos sinais, foram realizados alguns ensaios de correntes parasitas utilizando a sonda tipo

Pancake, conforme especificada no item 3.2.2.2. O objetivo foi comparar as características dos sinais das sondas superficiais com as sondas bobinas, fora e dentro do espelho e avaliar sua detectabilidade nas descontinuidades inseridas nos corpos de prova. Foram escolhidos alguns CP para estes ensaios, com ênfase nos CP com TC, conforme a seguir:

14 - Calibração para o ensaio de correntes parasitas utilizando o Padrão ASME (CP 1 - figura 3.1) com a sonda especial tipo *Pancake*, especificada no item 4.2.2.2. Os sinais da sonda superficial foram comparados com o sinal da sonda bobina.

15 - Ensaio de correntes parasitas no padrão de trincas circunferenciais (CP 6 - figura 3.6) fora espelho. Posteriormente este padrão TC foi inserido dentro do espelho, posicionando a trinca de 60% sob o mesmo e coletando os sinais de correntes parasitas. Os sinais da sonda superficial e bobina fora do espelho foram comparados com os obtidos dentro do espelho.

16- Ensaios de correntes parasitas nos corpos de prova com TC 100% (CP 10 - figura 3.10), TC 50% (CP11 figura 3.11) e TC 20% (CP12 - figura 3.12). A escolha destes corpos de prova é devido à orientação não favorável da TC para as sondas bobinas.

Finalmente foram realizados ensaios de correntes parasitas com a sonda tipo *Array*. Os objetivos foram similares aos da utilização da sonda *Pancake*, isto é, avaliar também as vantagens, limitações e ganhos de detectabilidade principalmente nas TC. Foram escolhidos alguns CP para estes ensaios, com ênfase nos CP com TC. Segue a sequência de ensaios utilizada:

17- Varredura do padrão ASME (CP 1 - figura 3.1) com a sonda *Array*, conforme especificada no item 3.2.2.3, para avaliar a detectabilidade dos sinais de cada descontinuidade do padrão.

18- Ensaio de correntes parasitas no tubo sem descontinuidade (CP 2) fora do espelho.

19- Ensaio de correntes parasitas no padrão de TL (CP 5 - figura 3.5) na condição fora do espelho, para avaliar a característica do sinal e a detectabilidade de cada descontinuidade do padrão e comparar com os resultados obtidos com a sonda bobina e *Pancake*.

20- Ensaio de correntes parasitas no padrão de TC (CP 6 - figura 3.6) fora do espelho para avaliar a característica do sinal e a detectabilidade de cada descontinuidade do padrão, comparando com os resultados obtidos com a sonda bobina e *Pancake*.

21- Ensaio de correntes parasitas no corpo de prova com 03 TC com 100% profundidade (CP 10 - figura 3.10) fora e dentro do espelho. Os sinais de correntes parasitas do CP 10 de cada trinca localizada na RE, RT e RNE fora do espelho foram comparados com os obtidos dentro do espelho.

22- Ensaio de correntes parasitas no corpo de prova com 03 TC com 50% profundidade (CP 11 - figura 3.11) fora e dentro do espelho. Os sinais de correntes parasitas do CP 11 de cada trinca localizada na RE, RT e RNE fora do espelho foram comparados com os obtidos dentro do espelho.

23- Ensaio de correntes parasitas no corpo de prova com 03 TC com 20% profundidade (CP 12 - figura 3.12) fora e dentro do espelho. Os sinais de correntes parasitas do CP 12 de cada trinca localizada na RE, RT e RNE fora do espelho foram comparados com os obtidos dentro do espelho.

Em suma, para avaliar o efeito da presença do espelho, da mandrilagem e frestas os corpos de prova e padrões foram ensaiados fora e dentro do espelho, com sonda convencional e sondas especiais tipo *Pancake* e *Array*.

O sinal de cada descontinuidade sob o espelho obtido com a sonda bobina foi comparado com aquela produzida pelo padrão ASME, em relação a sua amplitude e ângulo de fase, em várias frequências e em canais absolutos e diferenciais. O objetivo foi permitir distinguir os sinais oriundos do efeito espelho e mandrilagens dos sinais de descontinuidades.

Uma vez obtida a assinatura do espelho e da mandrilagem, o sinal proveniente de uma descontinuidade será o resultado da diferença entre o da assinatura e o sinal da inspeção em serviço. Os sinais obtidos neste canal mixado servirão como base para o procedimento para inspeções de campo.

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos dos ensaios descritos no capítulo 3, que foram analisados e discutidos. Inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios de correntes parasitas com a sonda bobina em padrões (ASME, TL e TC) e em corpos de prova sem defeitos, visando avaliar a influência do espelho e da mandrilagem. Em seguida são apresentados os resultados dos ensaios com esta mesma sonda bobina em corpos de prova com TL e TC com 100, 50 e 20% de profundidade na RNE, RT e RE. Finalmente são apresentados os resultados referentes ao uso das sondas especiais de correntes parasitas *Pancake* e *Array*. Todos estes resultados foram avaliados de uma forma comparativa, com o intuito de identificar as vantagens e limitações inerentes às próprias características intrínsecas das sondas utilizadas.

4.1 INFLUÊNCIA DO ESPELHO E MANDRILAGEM NO ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS

Os resultados dos ensaios realizados revelam que as presenças do espelho e da mandrilagem produzem sinais espúrios, indesejáveis, que dificultam a interpretação dos sinais oriundos de defeitos presentes nesta região. A seguir são analisados estes efeitos de uma forma individualizada e interativa.

Para efeito deste estudo foram identificadas as seguintes regiões no feixe tubular, esquematizadas na figura 4.1:

T - tubo sem influência do espelho e da mandrilagem

EE - região de entrada do espelho

SE - região da saída do espelho

RF - região da fresta entre o tubo e espelho

RNE - região não expandida por mandrilamento

RT - região de transição do tubo com e sem mandrilamento dentro do espelho

RE - região expandida por mandrilamento localizada dentro do espelho

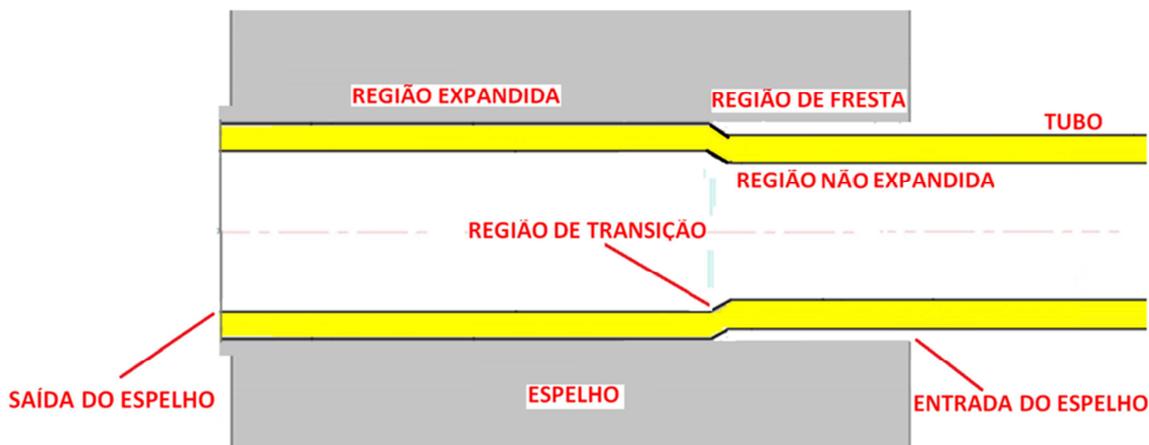


Figura 4.1 - Regiões do feixe tubular próximo ao espelho

Fonte: O autor (2013).

4.1.1 Efeito do espelho

Um tubo isento de descontinuidades e sem mandrilagem de encosto (CP2) foi inserido no espelho para avaliar o comportamento do sinal do ensaio de correntes parasitas sob a influência apenas deste componente. Uma parte do tubo ficou fora do espelho permitindo comparar os sinais fora e dentro do espelho.

A figura 4.2 ilustra o sentido da varredura da sonda no CP 2 e a tela do aparelho. Os registros dos sinais são visualizados na carta de registro (sinal do canal x tempo), no canal diferencial D90 e absoluto A90, fora e dentro do espelho, com destaque para o sinal da EE. Observa-se que o espelho provocou uma variação da impedância na região da EE.

A variação da impedância da sonda nesta região pode ser visualizada nos planos de impedância destes canais D90 e A90. Os valores característicos dos sinais como amplitude e ângulo de fase são mostrados no plano de impedância de cada canal selecionado, para o sinal correspondente.

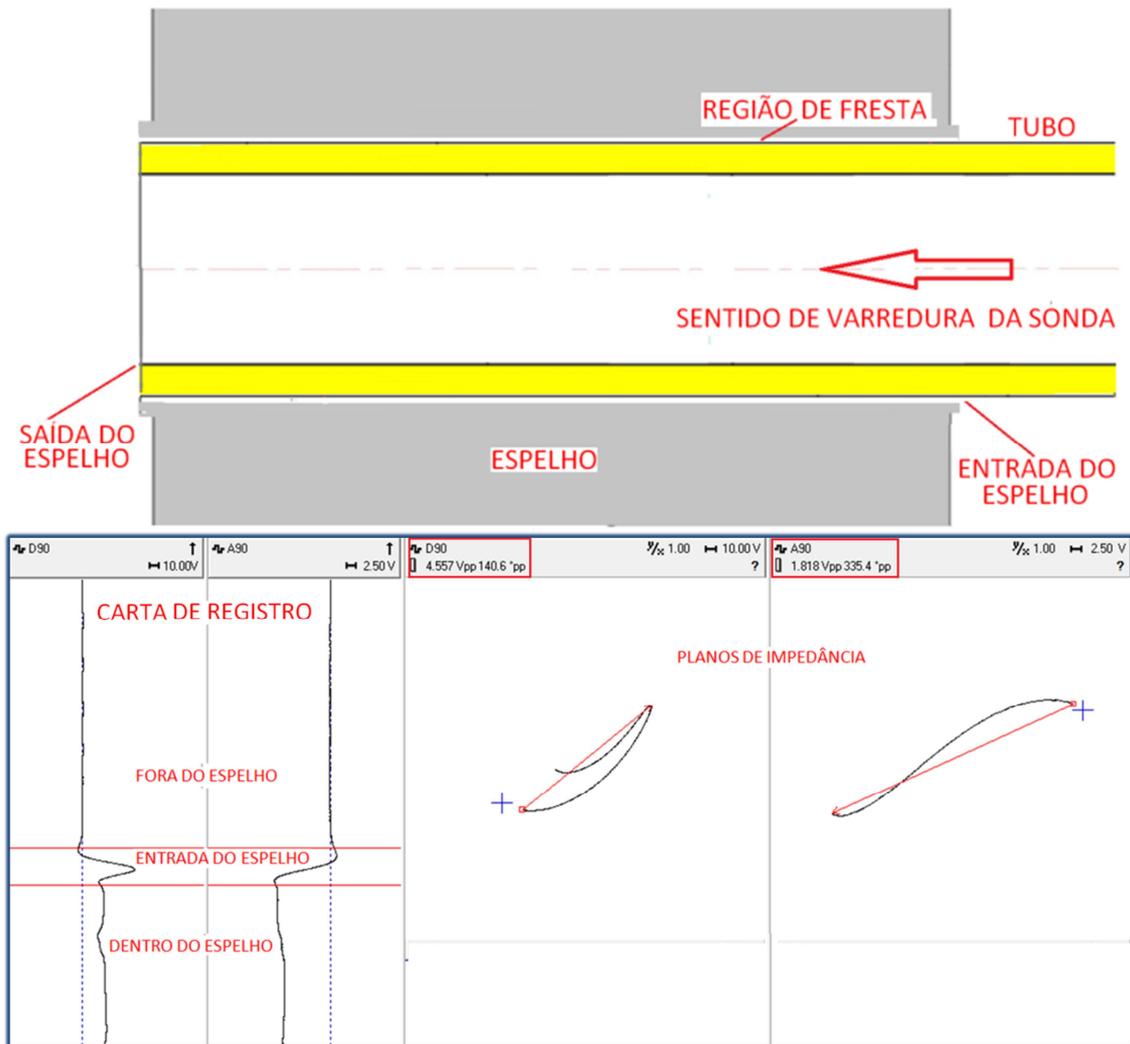


Figura 4.2 - Registros do ensaio de correntes parasitas no CP 2 fora e dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

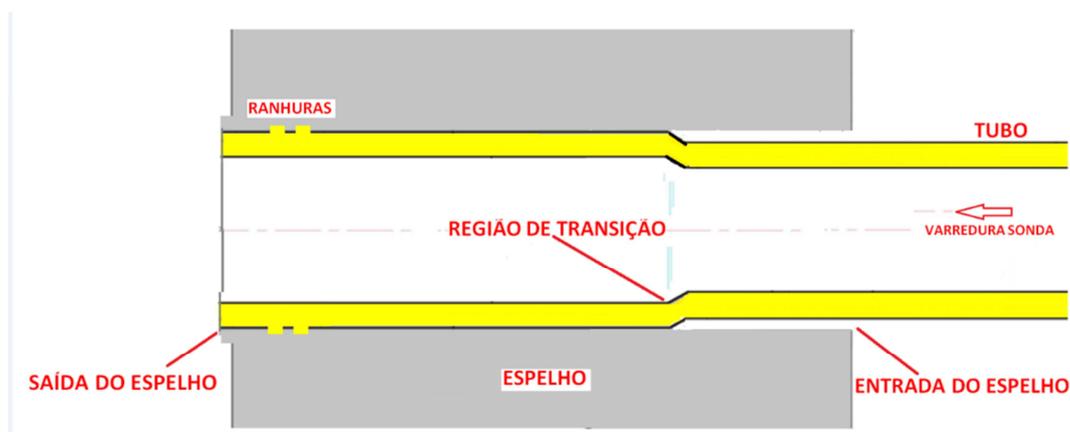
A figura 4.2 mostra que a impedância do tubo sem descontinuidades dentro do espelho foi alterada em relação ao sinal do tubo fora, registrada tanto no canal absoluto quanto no canal diferencial. O sinal da EE selecionado registra valores de amplitudes de 4,557 V no canal D90 e de 1,818 V no A90. Como será visto mais adiante estes valores são significativos quando comparados ao valor de 1V obtida no furo passante de 1,32 mm do padrão ASME. Desta forma o sinal de qualquer descontinuidade na região EE será evidentemente sobreposto aos característicos deste efeito geométrico, dificultando sua identificação. Este sinal pode afetar a sensibilidade de detecção dos sinais de descontinuidades nesta região, como será visto nos resultados mais adiante.

A figura 4.3 mostra no canal D90 da carta de registro que as mandrilagens produzem sinais de grande amplitude nas RT. O canal MX1 da carta de registro também revela na região em destaque que estes sinais podem ser suprimidos por mixagem.

A variação da impedância da sonda na RT pode ser visualizada nos planos de impedância nos canais D90 e MX1. A comparação dos sinais nos planos de impedância D90 e MX1 mostra que a ferramenta de mixagem de sinais é bastante efetiva em suprimir sinais, neste caso o sinal da RT. No plano de impedância do canal D90 o sinal da RT selecionado possui uma amplitude de 3,196V, que foi reduzida para 0,161V no canal mixado MX1, evidenciando a supressão do sinal da RT neste canal. Esta operação será de grande valia na melhora da detectabilidade de defeitos localizados na EE, RT e SE, como será mostrado ao longo do trabalho.

4.1.3 Efeito conjunto espelho, mandrilagem e ranhuras

A figura 4.4 ilustra o sentido de varredura e mostra o resultado obtido durante o ensaio de correntes parasitas no tubo isento de discontinuidades, fixado por mandrilagem no espelho no furo com ranhuras (CP4 figura 3.4).



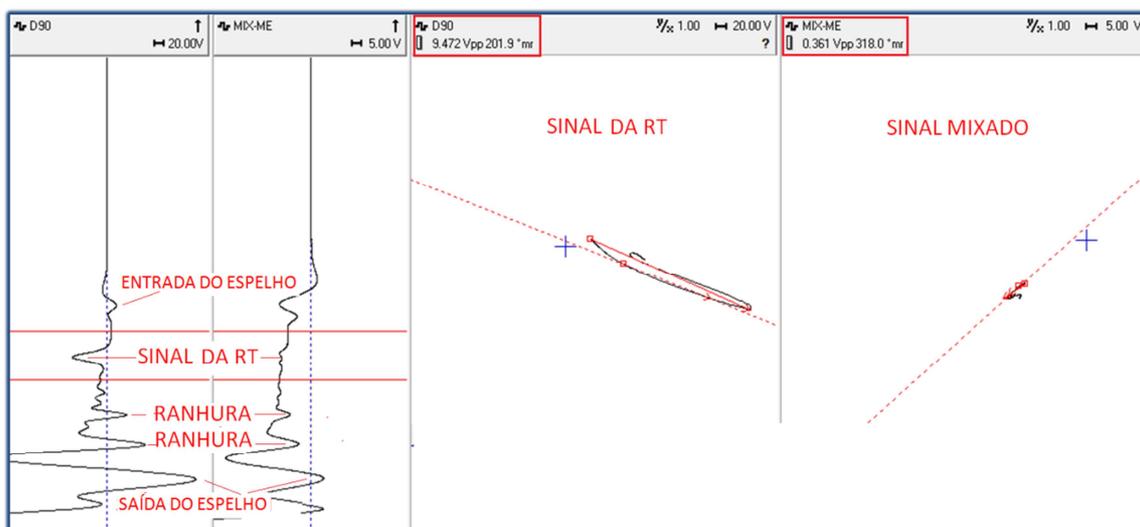


Figura 4.4 - Registros do ensaio de correntes parasitas CP 4 dentro do espelho no furo com ranhuras

Fonte: O autor (2013).

O CP4 mandrilado no espelho, que simula uma situação real de montagem, produziu vários sinais espúrios e indesejáveis, que podem se sobrepor a sinais produzidos por eventuais discontinuidades existentes. Em outras palavras, esta região apresenta uma maior dificuldade de identificação e caracterização de defeitos, seja por uma redução da amplitude do seu sinal ou pela análise equivocada de sinais espúrios, que podem resultar em falsas indicações.

A utilização de equipamento de multifrequência e multiparâmetros é útil para diminuir problemas de superposição de sinais, retirando do sinal de interesse (descontinuidade) os sinais causados pela interferência da massa do espelho, chicanas, mandrilagens, depósitos magnéticos, etc. Estes sinais indesejáveis podem ser suprimidos por mixagem. Na figura 4.4 o sinal da RT, que está em destaque, aparece claramente na carta de registro do canal D90 e é suprimido no canal MIXME criado para este fim. Neste caso, como não há nenhuma descontinuidade sob a mandrilagem, o seu sinal é totalmente suprimido no canal MIXME.

Qualquer sinal característico que indique a presença de descontinuidade na região do espelho será identificado com maior facilidade nos canais mixados para cada efeito geométrico tais como a RT e a EE. Neste CP3 em particular, o sinal armazenado para mixagem no canal MIX foi o da RT. Por esta razão, apenas o sinal proveniente

desta região foi suprimido. Todos os outros sinais provenientes da EE, SE e ranhuras, embora tenham sido subtraídos do sinal da RT, permanecem quase inalterados no canal MIXME.

Como considerações parciais os resultados dos ensaios de correntes parasitas com sonda bobina na região do espelho indicam que:

- As presenças do espelho, da mandrilagem e das ranhuras resultam em sinais espúrios, indesejáveis, que dificultam a interpretação dos sinais oriundos de defeitos nesta região.
- O sinal do espelho em si resulta no aumento do ruído (background) que afeta a detectabilidade dos defeitos em função da redução da relação sinal-ruído. No entanto, na entrada/saída do espelho e na RT estes sinais são de grande amplitude, reduzindo a detectabilidade, principalmente de sinais de baixas amplitudes de pequenas descontinuidades.
- A utilização de sistemas com multifrequências e multicanais permite separar e caracterizar defeitos dos sinais espúrios indesejáveis oriundos de geometrias, depósitos, etc. Com a utilização de canais mixados é possível subtrair a influência destes sinais, melhorando a detectabilidade e a estimativa do dimensionamento de descontinuidades presentes nestas regiões.

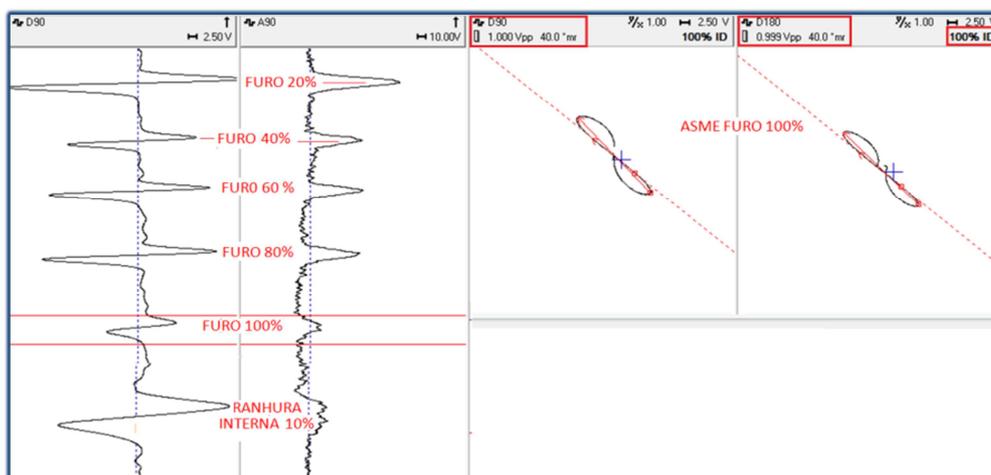
4.2 INFLUÊNCIA DO ESPELHO NA CALIBRAÇÃO CONVENCIONAL COM O PADRÃO ASME

Inicialmente o padrão ASME (CP1 - figura 3.1) foi calibrado com a sonda convencional tipo bobina, seguindo os requisitos especificados na referida norma ASME, Seção V, artigo 8. Para avaliar a influência do espelho nas características destes sinais cada descontinuidade do padrão foi inserida individualmente no espelho e obtidos novos registros dos sinais, agora dentro do espelho. Com isso foi possível comparar o sinal da descontinuidade obtido na calibração convencional com o sinal do ensaio de correntes parasitas com tubo de calibração colocado no interior do espelho. Esta situação é representativa da RF no espelho, conforme definida na figura 4.1.

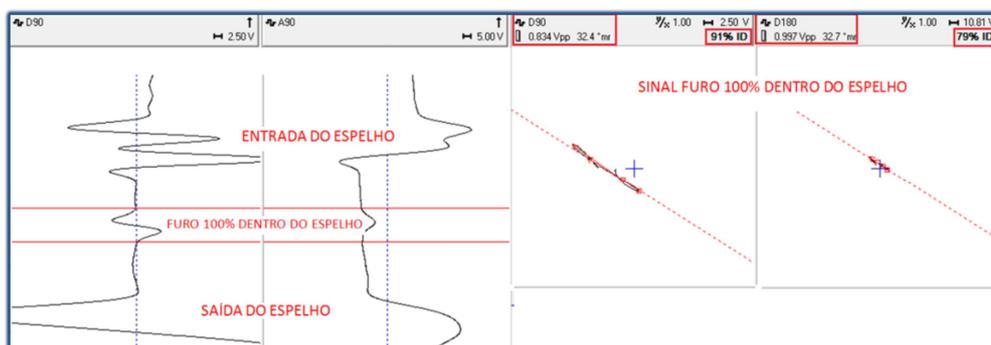
A figura 4.5 (a) mostra os sinais de todas as descontinuidades do padrão ASME, na condição fora do espelho, sendo representado na carta de registro os canais D90 e

A90. Observa-se que ambos os canais apresentaram resultados semelhantes. A descontinuidade de 100% passante, cujo sinal está em destaque no plano de impedância, foi inserida dentro do espelho e um novo sinal foi obtido conforme mostrado na figura 4.5 (b). O espelho provocou uma pequena redução do valor de amplitude do sinal desta descontinuidade, que foi reduzida de 1V (fora do espelho) para 0,834 V (dentro do espelho), conforme indicado no plano de impedância do canal D90.

Em relação à influência do espelho no dimensionamento podemos avaliar a alteração do ângulo de fase no plano de impedância do canal D180, canal normalmente utilizado para este fim. Comparando as figura 4.5 (a) e (b) observamos que na calibração fora do espelho o ângulo de fase do furo 100% foi ajustado para 40° . Dentro do espelho este valor foi alterado para $32,7^\circ$, representando 79% de profundidade.



(a)



(b)

Figura 4.5 - Registro dos parâmetros dos sinais do padrão ASME com destaque para o furo 100%

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.6 mostra o sinal da descontinuidade do padrão ASME furo 20% na condição fora e dentro do espelho. A figura 4.6 (a) mostra o sinal de todas as descontinuidades do Padrão ASME, na condição fora do espelho, sendo representado na carta de registro os canais D90 e A90. Observa-se que ambos os canais apresentaram resultados semelhantes. A descontinuidade de 20%, cujo sinal está em destaque, foi inserida dentro do espelho um novo sinal foi obtido, conforme mostrado na figura 4.6 (b).

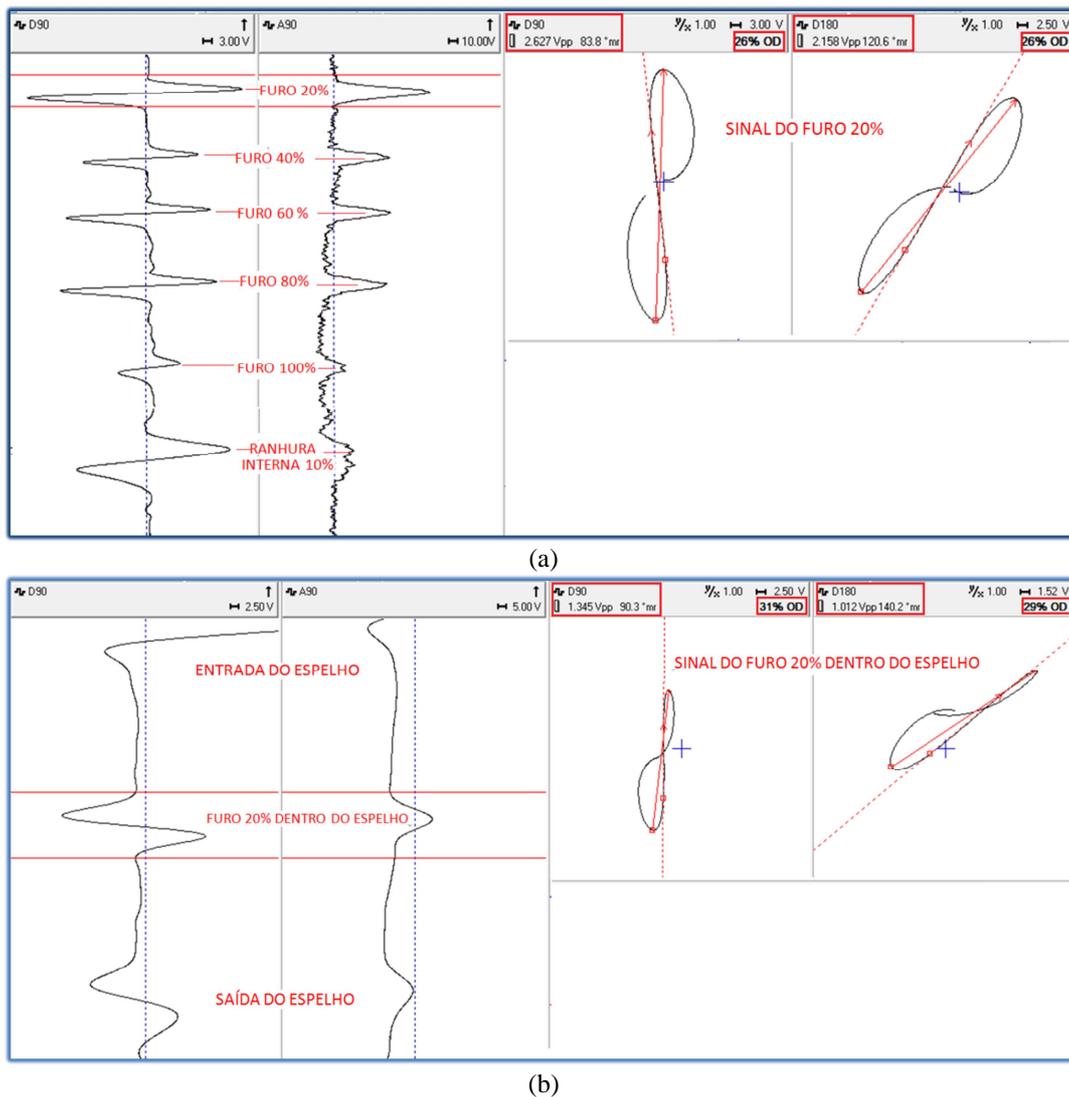


Figura 4.6 - Registro dos parâmetros da calibração do padrão ASME furo 20%

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

Comparando as figura 4.6 (a) e (b) observamos que o espelho provocou uma redução dos valores de amplitude do sinal desta descontinuidade, que foi reduzida de 2,627 V (fora do espelho) para 1,345 V (dentro do espelho), conforme indicado no plano de impedância do canal D90. Com estes valores de amplitude a detectabilidade dos sinais foi mantida tanto no canal diferencial (D90) como no canal absoluto A90.

Em relação ao dimensionamento podemos observar no canal D180 que na calibração, fora do espelho, o ângulo de fase do furo 20% foi ajustado para 120,6°, representando 26% de profundidade e alterado dentro do espelho para 140,2°, representado 29% de profundidade.

Este procedimento foi repetido para todas as descontinuidades do padrão, coletando a amplitude e ângulo de fase do sinal de cada descontinuidade fora e depois dentro do espelho.

Com estes resultados foi possível montar a tabela 4.1. Ela representa os valores de amplitude dos sinais obtidos no canal D90 e do ângulo de fase e profundidade obtidas no canal D180, para cada descontinuidade do padrão, fora e dentro do espelho. Observa-se que dentro do espelho ocorre uma redução nas amplitudes e uma alteração dos ângulos de fase e profundidade dos sinais de todas as descontinuidades do padrão ASME.

Tabela 4.1 - Parâmetros dos sinais do padrão ASME fora e dentro do espelho

	FORA DO ESPELHO			DENTRO DO ESPELHO		
	D 90 AMPLITUDE (V)	D 180 ÂNGULO DE FASE (°)	D 180 PROFUNDIDADE %	D 90 AMPLITUDE (V)	D 180 ÂNGULO DE FASE(°)	D 180 PROFUNDIDADE %
FURO PASSANTE 1,32mm	1	40	100	0,834	32,7	79
FURO DE 80%	2,276	57	86	1,344	93,4	64
FURO DE 60%	1,834	89	58	0,918	32,3	78
FURO DE 40%	1,411	113,3	34	1,247	93	64
4 FUIROS DE 20%	2,627	120,6	26	1,345	140,2	29
RANHURA INTERNA 10%	6,092	5,9	10	5,594	7,7	8

Fonte: O autor (2013).

As figuras 4.7 e 4.8 mostram graficamente os valores da tabelas 4.1, evidenciando a influência do espelho na amplitude e ângulo de fase dos sinais das descontinuidades do padrão ASME.

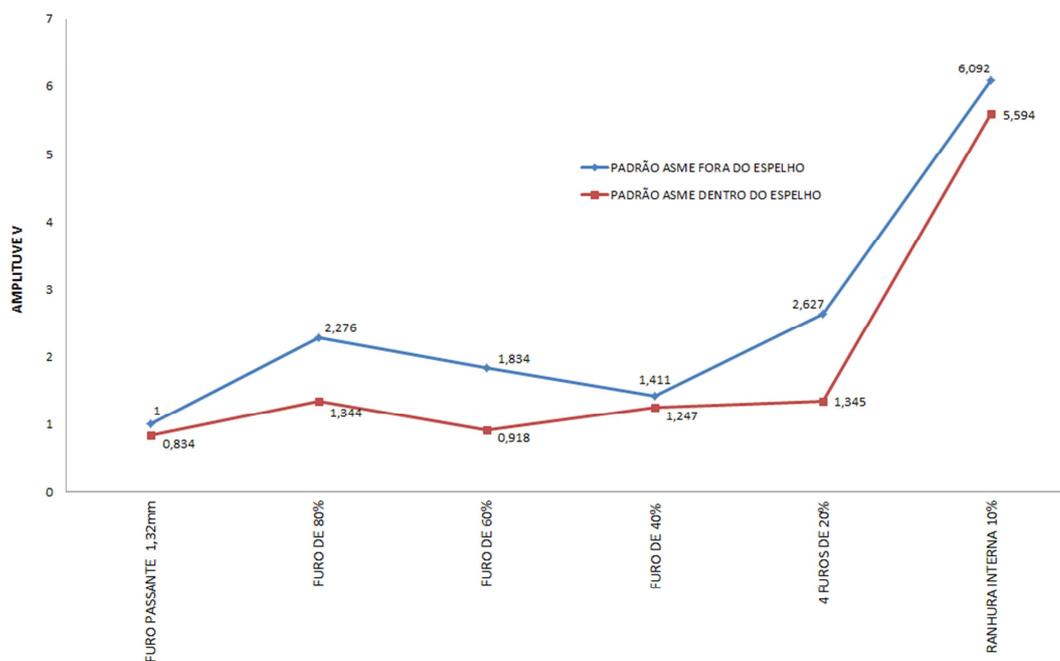


Figura 4.7 - Amplitudes dos sinais do padrão ASME fora e dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.7 mostra que as amplitudes dos sinais de algumas descontinuidades do padrão ASME dentro do espelho foram reduzidas, porém ficaram próximas de 1,0 V, que corresponde a menor amplitude obtida no furo passante de 1,32mm do padrão fora do espelho. Os resultados mostram que no padrão ASME esta influência é pequena, sendo que em algumas descontinuidades não há diferença de amplitudes. O padrão ASME dentro do espelho pode ser considerado como RF devido a folga tubo padrão x furo espelho. Desta forma os resultados indicam semelhança na detectabilidade nas regiões RF e T, definidas na figura 4.1.

A influência do espelho nos sinais das descontinuidades do padrão ASME de calibração foi avaliada quanto ao seu dimensionamento. A figura 4.8 mostra comparativamente a profundidade dos sinais das descontinuidades do padrão ASME dentro do espelho com os valores obtidos na calibração fora do espelho.

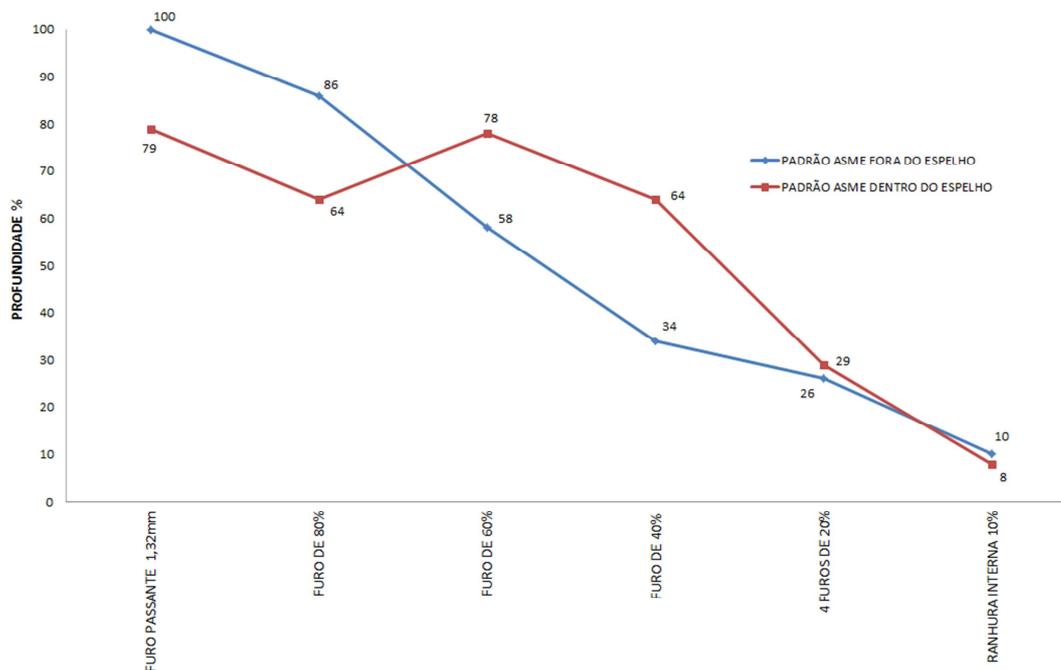


Figura 4.8 - Profundidades dos sinais do Padrão ASME fora e dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

Como mostrado na figura 4.8, as descontinuidades externas com até 20% de profundidades e as internas não sofreram grandes interferências do espelho. Descontinuidades externas de 40 e 60% de profundidade apresentaram variações consideradas conservadoras, isto é, indicaram profundidades maiores do que os valores reais. Entretanto, as descontinuidades externas de 80% e 100% de profundidades apresentaram dimensionamento menor que os valores reais.

A acurácia no dimensionamento é influenciada por vários fatores, não sendo possível neste estudo avaliar a influência do espelho de uma forma independente. Entretanto ele mostra a necessidade de correção da curva de calibração para avaliar descontinuidades na RF. Esta dificuldade de dimensionamento pode estar associada ao tamanho físico dos danos, tamanho da bobina e outras. Devemos observar que algumas descontinuidades não mostram uma boa correlação entre o ângulo de fase e sua profundidade utilizando o padrão de referência ASME. Em alguns casos podemos confeccionar padrões com o mesmo tipo de descontinuidade a ser avaliada e gerar uma curva correlacionando a amplitude do sinal e a profundidade da descontinuidade para melhor interpretar indicações nesta região, como representado na figura 2.3.8.

Em suma, como considerações parciais em relação à influência do espelho nos sinais das descontinuidades do padrão ASME os resultados indicam que:

- A presença do espelho altera as principais características dos sinais das descontinuidades do padrão ASME definidos na calibração convencional, como amplitude e ângulo de fase.
- Observa-se uma pequena redução na amplitude dos sinais de algumas descontinuidades, que não afeta a detectabilidade das descontinuidades do padrão ASME dentro do espelho.
- Em relação ao ângulo de fase observa-se um efeito mais significativo, reduzindo a confiabilidade na precisão do dimensionamento (acurácia).
- Como será visto mais adiante a utilização da calibração convencional do padrão ASME não se mostra muito adequada para dimensionar defeitos representativos das descontinuidades lineares, tipo trincas típicas da região de frestas do espelho.

4.3 DETECTABILIDADE DOS PADRÕES DE TRINCAS LONGITUDINAIS (TL) E DE TRINCAS CIRCUNFERENCIAIS (TC)

Os padrões com trincas longitudinais TL (CP 5 - figura 3.5) e circunferenciais TC (CP6 - figura 3.6) foram ensaiados por correntes parasitas nas condições fora do espelho, representando a região T e dentro do espelho, representando a região RF. Cada padrão possui trincas com 20%, 40%, 60%, 80% e 100% de profundidade. As TL possuem comprimento de 10 mm e as TC variam conforme sua profundidade. O objetivo foi avaliar a influência do espelho na detectabilidade das trincas nestes padrões, tendo o padrão ASME como base para comparação.

4.3.1 Padrão de TL

A figura 4.9 mostra os registros dos sinais de correntes parasitas realizados no CP 5 (figura 3.5 - padrão TL) fora do espelho, que possui TL nas profundidades de 100, 80, 60, 40 e 20%.

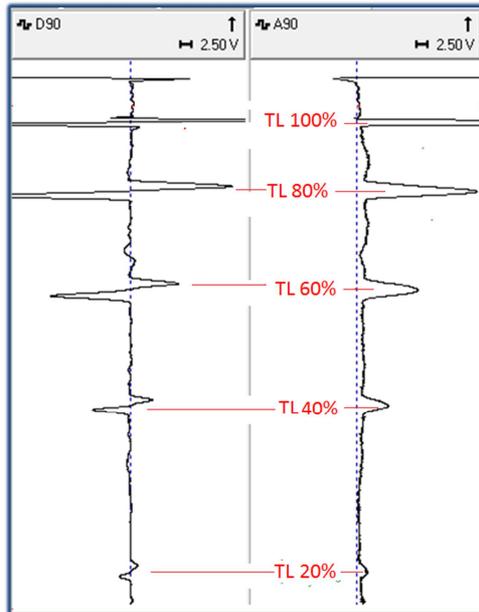
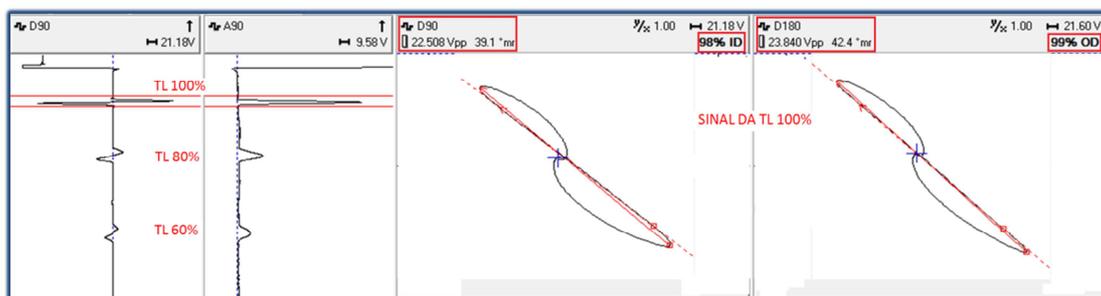


Figura 4.9 - Registro da varredura do CP 5 fora do espelho

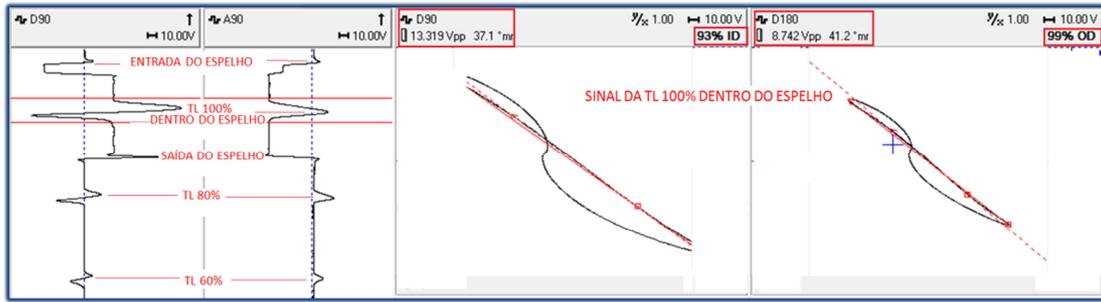
Fonte: O autor (2013).

A figura 4.9 mostra nos canais D90 e A90 da carta de registro que fora do espelho é possível detectar os sinais de todas as trincas do padrão TL, com resultados semelhantes em ambos os canais. Nota-se uma redução da amplitude do sinal em função da diminuição da sua profundidade da TL. O valor de 20% de profundidade representa o limiar de detectabilidade das trincas TL do padrão, fora do espelho.

A figura 4.10 (a) mostra em destaque o registro do sinal da TL 100% do CP 5 fora do espelho. Esta descontinuidade TL 100% foi inserida dentro do espelho e um novo sinal foi obtido, conforme registro mostrado na figura 4.10 (b).



(a)



(b)

Figura 4.10 - Registro dos sinais da TL 100% do CP 5

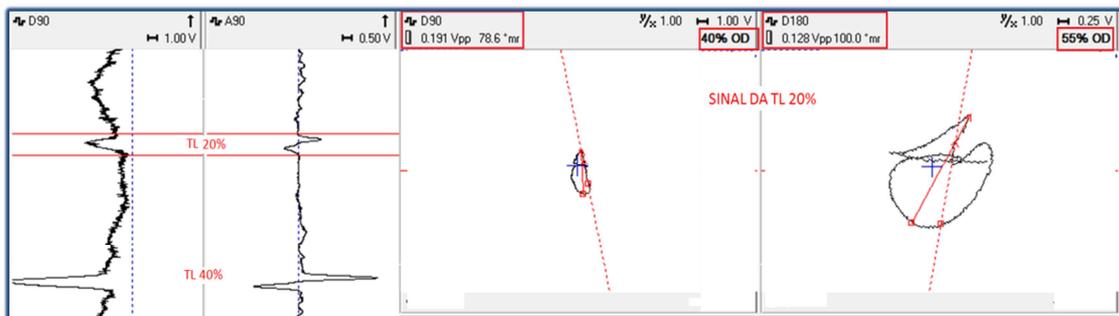
(a) fora do espelho (b) dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

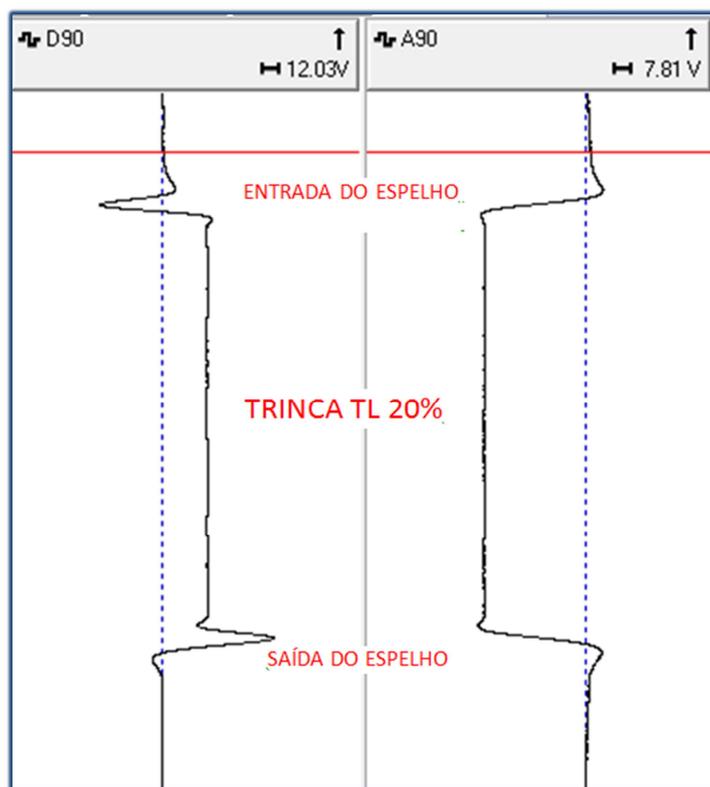
Comparando as figura 4.10 (a) e (b) observamos no canal D90 que o espelho provocou uma redução dos valores da amplitude do sinal da TL 100% de 22,508V (fora do espelho) para 13,31 V (dentro do espelho). Este valor reduzido ainda é muito elevado, comparado com o valor de 1V do furo 100% passante do padrão ASME. Desta forma a TL100% mantém sua alta detectabilidade dentro do espelho. Podemos notar nos planos de impedância que o sinal se mantém com as mesmas características dentro e fora do espelho.

Podemos também observar no canal D180 do plano de impedância a variação do ângulo de fase do sinal da TL100% fora e dentro do espelho. Na figura 4.10 (a) o valor do ângulo foi de 42,4 °, indicando uma profundidade de 99 %. A figura 4.10 (b) mostra que este ângulo sofreu uma variação insignificante (41,2°) dentro do espelho, não alterando o dimensionamento da profundidade.

A figura 4.11(a) mostra em destaque o registro do sinal da TL 20% do CP 5 fora do espelho. Esta descontinuidade TL 20% foi inserida dentro do espelho e realizada um novo ensaio, conforme registro mostrado na figura 4.11(b).



(a)



(b)

Figura 4.11 - Registro dos sinais da TL 20% do CP 5

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

Na figura 4.11(a) observamos no canal D90 do plano de impedância o valor de amplitude de 0,191 V para o sinal da TL20%. Esta amplitude é muito baixa, sendo por esta razão um sinal de baixa detectabilidade, mesmo na condição fora do espelho. A figura 4.11(b) revela que, dentro do espelho, a amplitude do sinal da TL20% se torna insignificante, dificultando inclusive a identificação do seu sinal em ambos os canais D90 e A90 da carta de registro. O registro do sinal dentro do espelho na figura 4.11(b) não mostra indício algum que possa ser relacionado ao da TL 20%.

O ângulo de fase do sinal da TL20% indicado pela medição automática no canal D180 do plano de impedância da figura 4.11(a) foi de 100° , revelando uma profundidade de 55%. Este valor é maior que o valor real de 20% se traduzindo em um erro significativo. No plano de impedância é possível observar que o sinal está distorcido pela composição do sinal do defeito (de baixa amplitude) com outros sinais.

Como os sinais da TL 20% não foram detectados dentro do espelho não foi possível discutir o dimensionamento destas descontinuidades.

Para estimar o limiar de detectabilidade da TL dentro do espelho foi selecionado também o sinal da TL 40%. A figura 4.12(a) mostra em destaque o registro do sinal da TL 40% do CP 5 fora do espelho. Esta descontinuidade TL 40% foi inserida dentro do espelho e realizada um novo ensaio, conforme registro mostrado na figura 4.12(b).

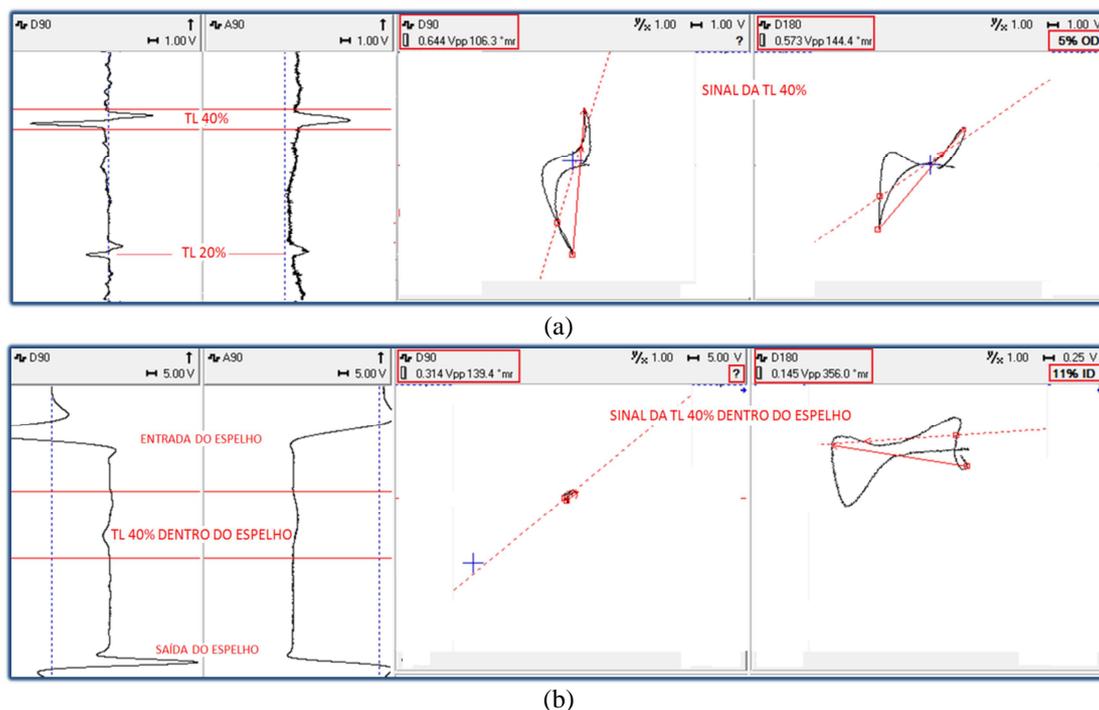


Figura 4.12 - Registro dos sinais da TL 40% do CP

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho.

Fonte: O autor (2013).

Na figura 4.12(a) observamos no canal D90 do plano de impedância o valor de amplitude de 0,644 V para o sinal da TL 40%, podendo ser considerado detectável com ajustes apropriados na calibração do padrão na condição fora do espelho. A figura 4.12(b) revela que, dentro do espelho, a amplitude do sinal da TL40% no canal D90 é de 0,314 V, que exige um melhor tratamento do sinal e uso de mixagem para manter esta média detectabilidade.

O ângulo de fase do sinal da TL 40% indicado pela medição automática no canal D180 do plano de impedância da figura 4.12(a) foi de 144,4°, indicando uma

profundidade de 5%. Este valor é maior que o valor real de 40%, se traduzindo em um erro significativo. No plano de impedância é possível observar que o sinal está distorcido. Na figura 4.12 (b), dentro do espelho, o canal D180 indica um ângulo de 356° e uma profundidade de 11%, valor que representa também um erro significativo pelos mesmos motivos.

O procedimento de inserir a descontinuidade do padrão TL dentro do espelho para avaliar sua influência foi repetido para todas as descontinuidades do padrão. Com isso foi possível coletar a amplitude e ângulo de fase do sinal de cada descontinuidade fora e dentro do espelho.

Com estes resultados foi possível montar a tabela 4.2 que mostra para cada descontinuidade do padrão TL os valores de amplitude do sinal no canal D90 e do ângulo de fase e profundidade no canal D180, fora e dentro do espelho. Observa-se que os sinais de todas as descontinuidades do padrão TL obtidos dentro do espelho sofrem uma redução na sua amplitude e uma alteração dos ângulos de fase e profundidade em relação à condição fora do espelho, quando considerados os resultados de medições automáticas tipicamente utilizadas em ensaios de campo.

Tabela 4.2 - Parâmetros dos sinais das trincas do padrão TL fora e dentro do espelho

TL	FORA DO ESPELHO			DENTRO DO ESPELHO		
	D 90	D 180		D 90	D 180	
	AMPLITUDE (V)	ÂNGULO DE FASE(°)	PROFUNDIDADE %	AMPLITUDE (V)	ÂNGULO DE FASE(°)	PROFUNDIDADE %
100%	22,50	42,4	99	13,31	41,2	99
80%	2,93	115,8	38	1,51	83,5	70
60%	1,39	122,0	32	0,63	98,3	56
40%	0,644	144,4	5	0,314	356,0	11
20%	0,191	100,0	55	-	-	-

Fonte: O autor (2013).

A tabela 4.2 revela que as TL 100 e 80%, mais profundas, a amplitude do sinal dentro do espelho se manteve acima da referência de 1 V, não afetando muito a sua detectabilidade. O sinal da TL 60% dentro do espelho já apresenta um valor de amplitude de 0,632 V e sua detectabilidade é reduzida. Observa-se também que o valor da amplitude do sinal da TL20% já é muito baixo fora do espelho (0,191V), sendo por esta razão de baixa detectabilidade.

Quanto menor a profundidade da TL, menor será a amplitude do sinal. Conseqüentemente menor será a sua detectabilidade, principalmente se tiver sinais espúrios e indesejáveis sobrepostos ao do defeito.

4.3.2 Padrão de TC

A figura 4.13 mostra os registros dos sinais de correntes parasitas realizados no CP6 (figura 3.6 padrão TC) fora do espelho, que possui TC nas profundidades de 100, 80, 60 40 e 20%.

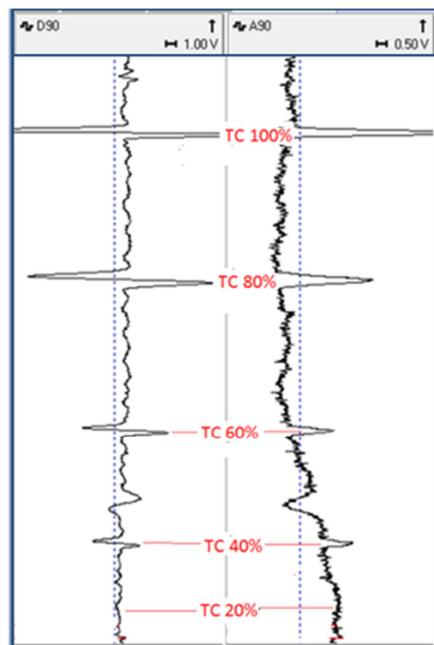


Figura 4.13 - Registro da varredura do Padrão de trincas TC

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.13 mostra nos canais D90 e A90 da carta de registro que fora do espelho não é possível detectar os sinais de todas as trincas do padrão TC, ao contrário do padrão TL. Os resultados são semelhantes em ambos os canais. Nota-se uma redução da amplitude do sinal em função da diminuição da sua profundidade da TL. O valor de 40% de profundidade representa o limiar de detectabilidade das trincas TC do padrão fora do espelho e os registros dos sinais não mostram nenhum indício que possa ser relacionado ao da TC 20%.

A figura 4.14(a) mostra em destaque o registro do sinal da TL 100% do CP 6 fora do espelho. Esta descontinuidade TC 100% foi inserida dentro do espelho e obtido um novo sinal, conforme registro mostrado na figura 4.14(b).

Comparando as figura 4.14 (a) e (b) observamos no canal D90 que o espelho provocou uma redução dos valores da amplitude do sinal da TC 100% de 2,883 V (fora do espelho) para 1,598 V (dentro do espelho). Este valor reduzido ainda está acima do valor de 1V do furo 100% passante do padrão ASME. Desta forma a TL100% mantém uma boa detectabilidade dentro do espelho. Podemos notar nos planos de impedância que o sinal se ainda mantém com as mesmas características dentro e fora do espelho.

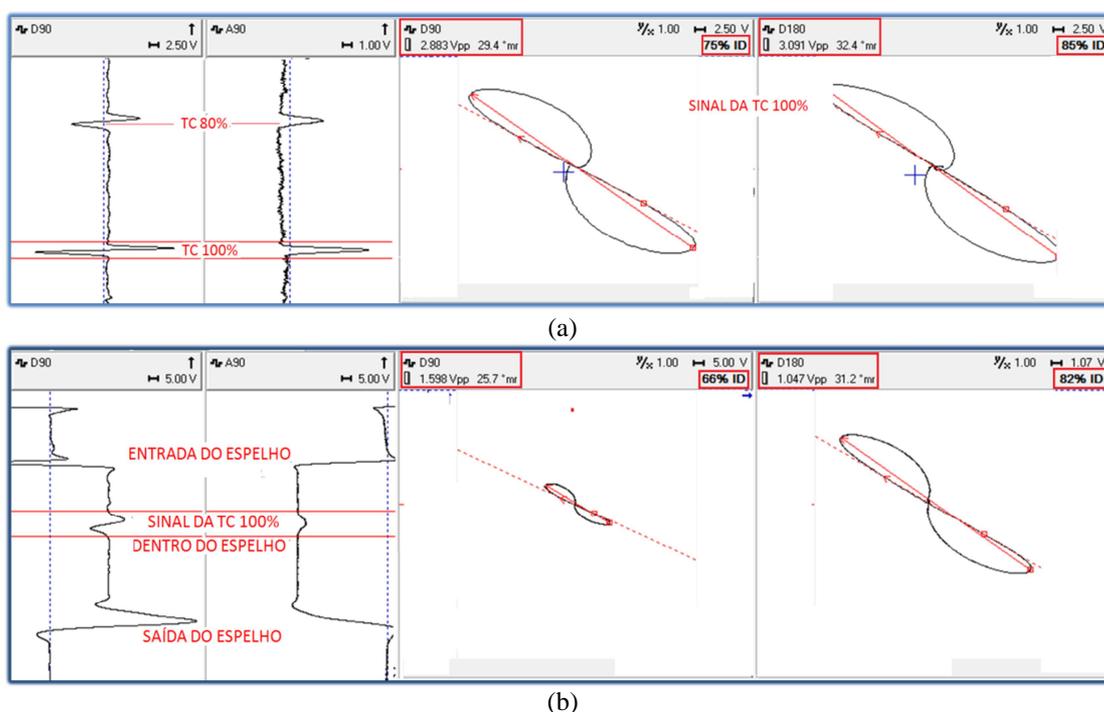


Figura 4.14 - Registro dos sinais TC 100% do padrão TC

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

Podemos também observar no canal D180 do plano de impedância a variação do ângulo de fase do sinal da TC100% fora e dentro do espelho. Na figura 4.14 (a) o valor do ângulo foi de 32,4 °, indicando uma profundidade de 85 %. A figura 4.14(b) mostra que este ângulo sofreu uma pequena variação (31,2°) dentro do espelho, alterando o dimensionamento da profundidade para 82%.

A figura 4.15(a) mostra em destaque o registro do sinal da TC 40% do CP 6 fora do espelho. Esta descontinuidade TC 40% foi inserida dentro do espelho e realizada um novo ensaio, conforme registro mostrado na figura 4.15(b).

Na figura 4.15(a) observamos no canal D90 do plano de impedância o valor de amplitude de 0,244 V para o sinal da TC 40%. Esta amplitude é baixa, sendo por esta razão um sinal de baixa detectabilidade, mesmo na condição fora do espelho. A figura 4.15(b) revela que, dentro do espelho, a amplitude do sinal da TC 40% se torna insignificante (0,113 V), dificultando inclusive a identificação do seu sinal em ambos os canais D90 e A90 da carta de registro. O registro do sinal dentro do espelho na figura 4.15(b) mostra apenas um indício que possa ser relacionado ao da TC 40%, isto é, o sinal foi suprimido dentro do espelho.

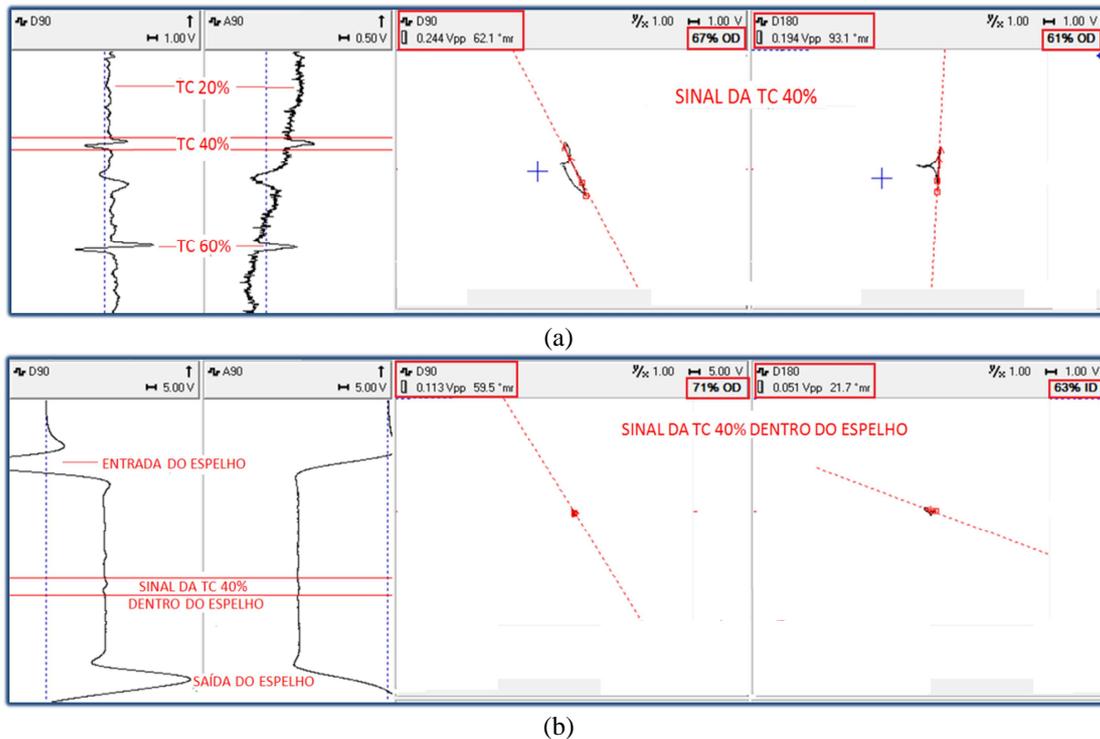


Figura 4.15 - Registro dos sinais TC 40% do padrão TC

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho.

Fonte: O autor (2013).

O ângulo de fase do sinal da TC 40% indicado no canal D180 do plano de impedância da figura 4.15(a) foi de $93,1^\circ$, indicando uma profundidade de 61%. Este

valor é maior que o valor real de 40%, se traduzindo em um erro significativo. Como o sinal da TC 40% não foi detectado dentro do espelho, não foi possível realizar esta avaliação.

Para estimar o limiar de detectabilidade da TC dentro do espelho foi selecionado também o sinal da TC 60%. A figura 4.16(a) mostra em destaque o registro do sinal da TC 60% do CP 6 fora do espelho. Esta descontinuidade TC 60% foi inserida dentro do espelho e realizada um novo ensaio, conforme registro mostrado na figura 4.16(b).

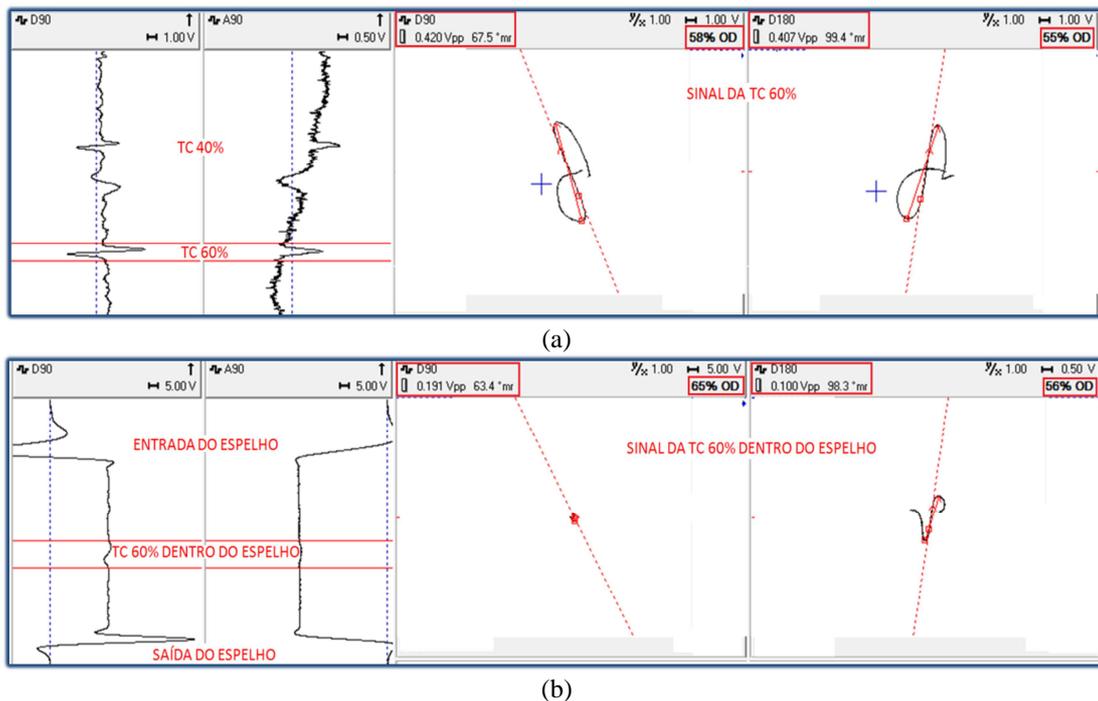


Figura 4.16 - Registro dos sinais TC 60% do padrão TC

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

Na figura 4.16(a) observamos no canal D90 do plano de impedância o valor de amplitude de 0,420 V para o sinal da TC 60%, podendo ser considerado um sinal de média detectabilidade na condição fora do espelho. A figura 4.16(b) mostra que, dentro do espelho, a amplitude do sinal da TC 60% no canal D90 é de 0,191 V, que exige um melhor tratamento do sinal e uso de mixagem, sendo este sinal de baixa detectabilidade.

O ângulo de fase do sinal da TC 60% indicado no canal D180 do plano de impedância da figura 4.16(a) foi de 99,4°, indicando uma profundidade de 55%. Este

valor é próximo ao valor real de 60%, se traduzindo em um erro insignificante. Na figura 4.16 (b), dentro do espelho, o canal D180 indica um ângulo de 98,3° e uma profundidade de 56%, resultado semelhante à condição fora do espelho.

O procedimento de inserir a descontinuidade do padrão TC dentro do comprimento do espelho para avaliar sua influência foi repetido para todas as descontinuidades do padrão TC e coletadas a amplitude e ângulo de fase do sinal de cada descontinuidade fora e dentro do espelho.

Com estes resultados foi possível montar a tabela 4.3 que mostra para cada descontinuidade do padrão TC os valores de amplitude do sinal no canal D90 e do ângulo de fase e profundidade no canal D180, fora e dentro do espelho. Como já observado no padrão TL os sinais de todas as descontinuidades do padrão TC obtidos dentro do espelho apresentaram redução de amplitude e uma alteração dos ângulos de fase e profundidade em relação à condição fora do espelho.

Tabela 4.3 - Parâmetros dos sinais das trincas do padrão TC fora e dentro do espelho

TC	FORA DO ESPELHO			DENTRO DO ESPELHO		
	D 90 AMPLITUDE (V)	D 180 ÂNGULO DE FASE(°)	D 180 PROFUNDIDADE %	D 90 AMPLITUDE (V)	D 180 ÂNGULO DE FASE(°)	D 180 PROFUNDIDADE %
100%	2,883	32,4	85	1,598	31,2	82
80%	0,974	78,8	73	0,444	83,5	70
60%	0,421	99,4	55	0,191	98,3	56
40%	0,244	93,1	61	0,113	21,7	63
20%	0,093	5,51	30			

Fonte: O autor (2013).

A tabela 4.3 revela que a TC 100 %, passante, a amplitude do sinal dentro do espelho se manteve acima da referência de 1 V, não afetando muito a sua detectabilidade. O sinal da TC 80% dentro do espelho já apresenta um valor de amplitude de 0,444 V e sua detectabilidade é reduzida. Observa-se também que o valor da amplitude do sinal da TC 40% já é muito baixo fora do espelho (0,244 V), sendo por esta razão de baixa detectabilidade.

Como observado nas trincas do padrão TL, quanto menor a profundidade da TC menor será a amplitude do sinal e conseqüentemente menor sua detectabilidade, principalmente se tiver sinais espúrios e indesejáveis sobrepostos ao do defeito.

Porém, as amplitudes dos sinais das trincas TC são sempre menores, quando comparadas com as de mesma profundidade do padrão TL. As sondas tipo bobina geram um fluxo de correntes parasitas no sentido circunferencial do tubo que passa paralelamente a descontinuidade circunferencial e sua densidade diminui na direção da superfície externa. Desta forma, nas TC mais superficiais esta redução de amplitude é muito mais relevante, reduzindo muito sua detectabilidade relativamente às TC mais profundas.

A figura 4.17 mostra a variação das amplitudes dos sinais dos padrões ASME, TL e TC fora do espelho, para cada profundidade das descontinuidades. Esta situação representa a região RT fora do espelho.

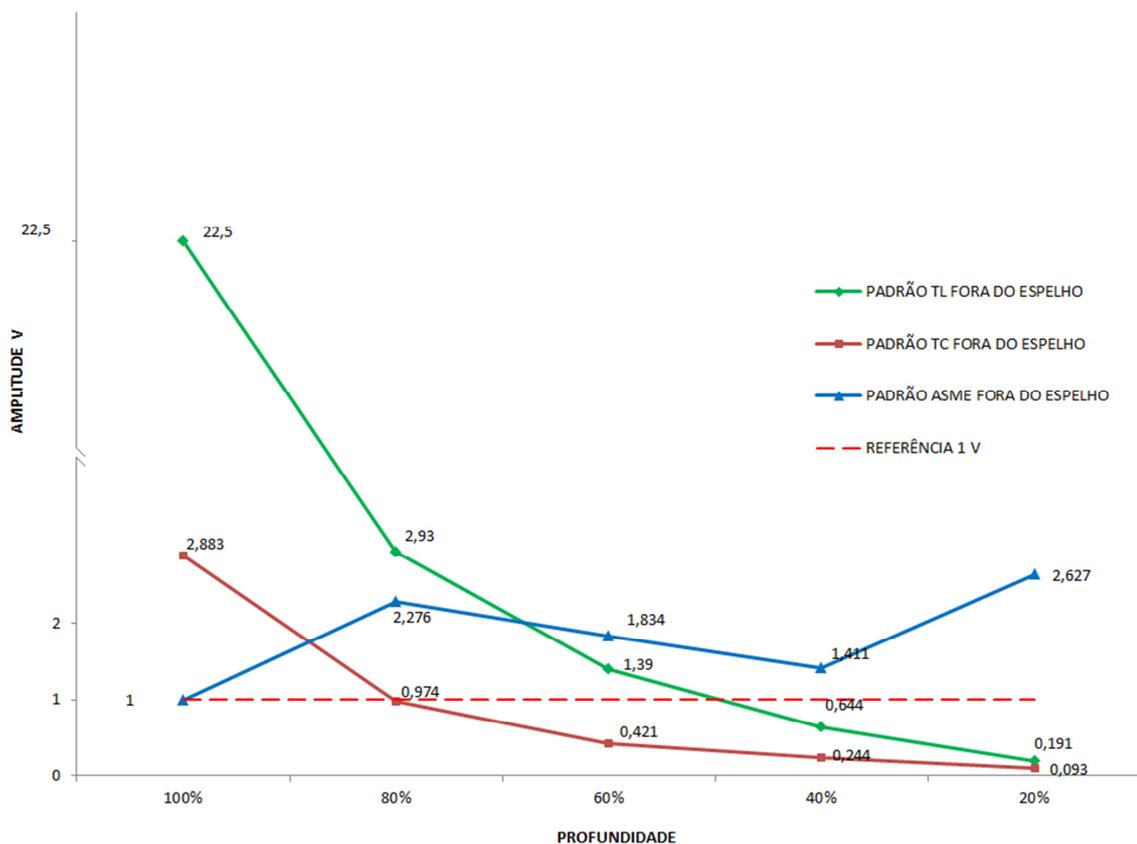


Figura 4.17 - Comparação de amplitudes x profundidades padrão ASME x TL x TC fora do espelho

Fonte: O autor (2013).

Podemos observar pela figura 4.17 que as amplitudes das TL 100% e TC 100% passantes são elevadas, quando comparadas a amplitude de 1 V do furo do padrão ASME. Porém por exemplo, na profundidade de 60% a amplitude da descontinuidade do padrão ASME foi de 1,834 V, maior que as da TL 60% e TC 60%, que foram de 1,390 V e 0,421 V (valores retirados das tabelas 4.1, 4.2 e 4.3).

Para melhor compreensão dos resultados da figura 4.17 é necessário avaliar alguns fatores de extrema importância na detectabilidade no ensaio de correntes parasitas em tubos, utilizando a sonda bobina interna. A maior densidade de correntes parasitas se encontra na superfície interna do tubo, próximo a bobina excitadora. Esta densidade diminui ao se afastar da bobina, isto é, externamente os fluxos de correntes são de baixas densidades. A perturbação dos fluxos de correntes de alta densidade resulta numa maior alteração na impedância da bobina e melhora a detectabilidade.

A orientação da descontinuidade em relação ao fluxo de correntes induzidas também é de grande relevância na detectabilidade. É essencial que a descontinuidade esteja a mais perpendicular possível ao fluxo de corrente induzida de modo a interceptar o maior número das linhas deste fluxo. As sondas bobinas internas geram fluxos de correntes circunferenciais na superfície e descontinuidades longitudinais serão favorecidas neste aspecto.

A dimensão da descontinuidade também é de grande relevância no aumento da interação com o fluxo de correntes induzidas. Quanto maior a dimensão da descontinuidade maior será área perturbada e maior números de linhas do fluxo de correntes interceptadas. Esta distorção das linhas do fluxo altera o trajeto da corrente, aumentando a distância percorrida e elevando a resistência total do circuito. Isto resulta em uma maior alteração da impedância da bobina que se traduz em um aumento da detectabilidade.

Desta forma, descontinuidades mais profundas e principalmente as passantes conseguem perturbar os fluxos de correntes de alta densidade, resultando numa maior alteração na impedância da bobina. Por outro lado, as descontinuidades mais superficiais vão perturbar fluxos de correntes superficiais com menores densidades, que consequentemente resultarão em menores alterações na impedância da bobina. Em relação à orientação, as descontinuidades longitudinais interagem mais com os fluxos de

correntes parasitas geradas pela sonda bobina do que as descontinuidades circunferenciais, causando maior alteração na impedância da sonda.

Portanto descontinuidades longitudinais profundas e com grandes dimensões são as que apresentam maiores detectabilidade. Isto explica porque às vezes não detectamos descontinuidades de dimensões relevantes, porém circunferenciais e superficiais externas.

A figura 4.18 ilustra esquematicamente estes aspectos na obtenção das amplitudes das descontinuidades de 60% mostrada na figura 4.17. É possível visualizar que o furo de 2,80 mm com profundidade de 60% do padrão ASME gera uma área perturbada no fluxo de corrente maior que as relativas a TL e TC 60%. Isto resulta numa maior alteração na impedância da bobina e na amplitude do sinal. Neste caso a densidade do fluxo de corrente é a mesma, pois as descontinuidades estão na mesma profundidade.

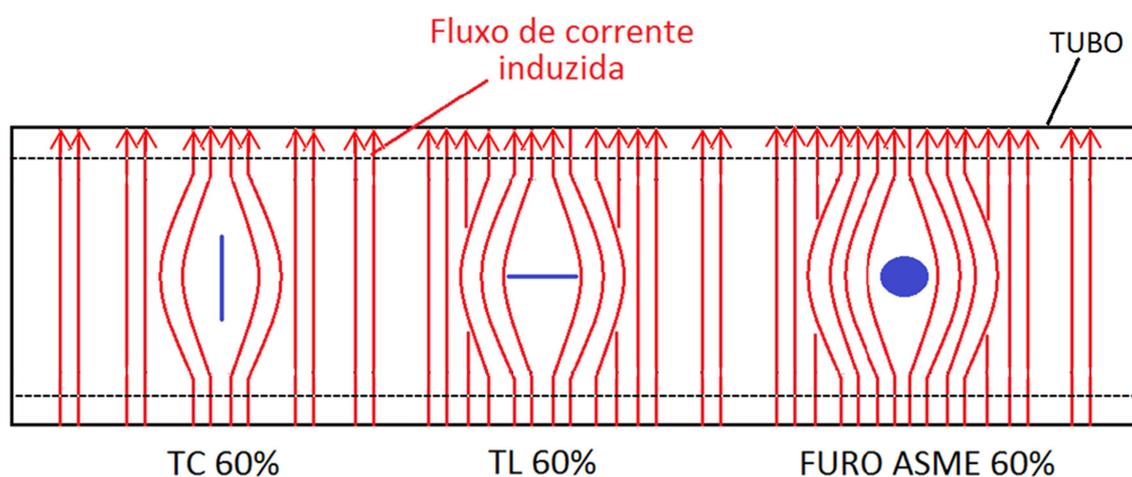


Figura 4.18 - Desenho esquemático da influência das descontinuidades com 60% de profundidade dos padrões ASME, TL e TC no fluxo de corrente induzida.

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.19 mostra a variação das amplitudes dos sinais dos padrões ASME, TL e TC nas condições dentro do espelho, para cada profundidade. Esta situação representa a região RF mostrada na figura 4.1.

Podemos observar pela figura 4.19 que as amplitudes das trincas passantes TL e TC se reduzem para todas as profundidades dentro do espelho. A TL passante permanece com elevada amplitude e a TC passante fica um pouco acima da amplitude

de 1 V do furo do padrão ASME sendo, a princípio, de fácil detecção. As trincas TL com 70% e as trincas TC com 90% de profundidade apresentam amplitudes próximas à referência de 1V e podem ser consideradas de boa detectabilidade. Menores profundidades vão requerer um melhor tratamento do sinal e depender da sua localização. A detectabilidade de trincas próximas à EE necessitará dos recursos de mixagem para melhor identificar e discriminar o sinal oriundo apenas do defeito. Os resultados também indicam maiores amplitudes dos sinais das longitudinais TL, sendo de mais fácil detecção.

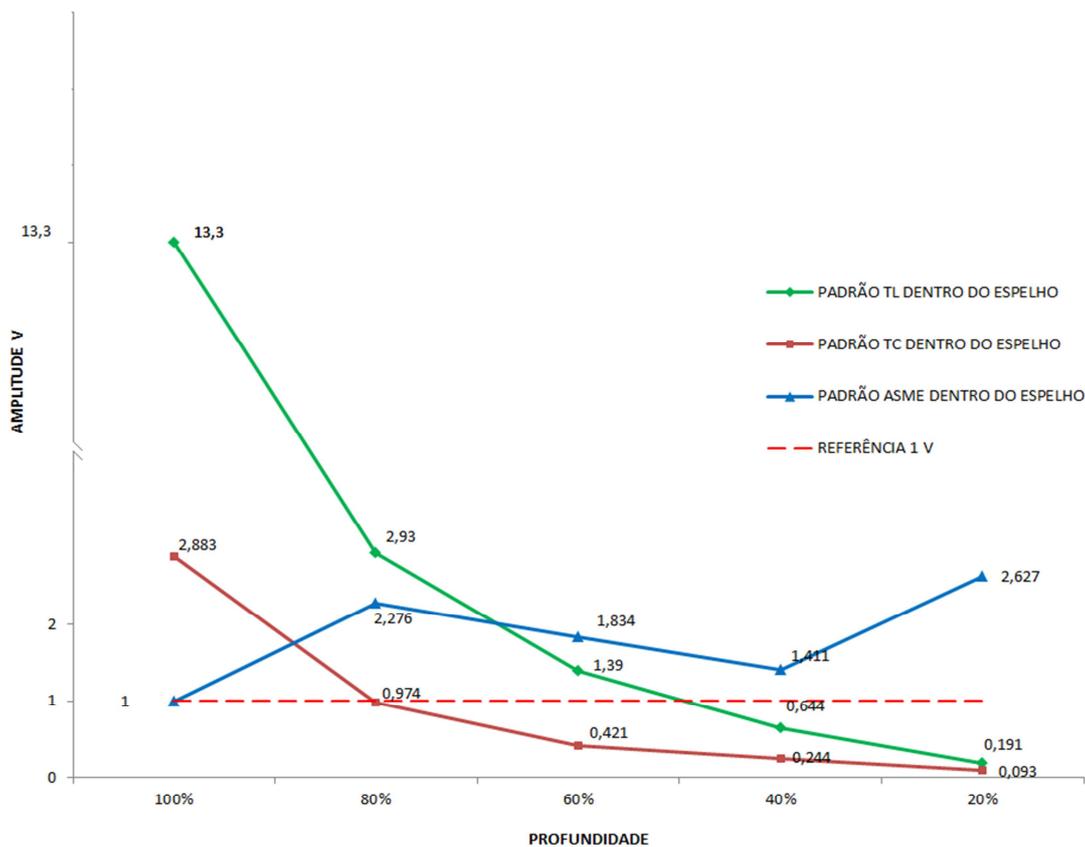


Figura 4.19 - Comparação de amplitudes x profundidades dos padrão ASME x TL x TC dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

Podemos observar pela figura 5.19 que as amplitudes das trincas passantes TL e TC se reduzem para todas as profundidades dentro do espelho. A TL passante

permanece com elevada amplitude e a TC passante fica um pouco acima da amplitude de 1 V do furo do padrão ASME sendo, a princípio, de fácil detecção.

As trincas TL com 70% e as trincas TC com 90% de profundidade apresentam amplitudes próximas à referência de 1V e podem ser consideradas de boa detectabilidade. Menores profundidades vão requerer um melhor tratamento do sinal e depender da sua localização. A detectabilidade de trincas próximas à EE necessitará dos recursos de mixagem para melhor identificar e discriminar o sinal oriundo apenas do defeito. Os resultados também indicam maiores amplitudes dos sinais das longitudinais TL, sendo de mais fácil detecção.

Esta avaliação preliminar da influência do espelho nas amplitudes e na detectabilidade nos padrões TL e TC foi importante e serviu de referência para os ensaios nos corpos de prova com trincas TL e TC com mandrilagem, a serem mostrados a seguir. Embora as dimensões das trincas dos padrões sejam maiores que os corpos de prova com mandrilagem o estudo permitiu focar os ensaios nos limiares de detectabilidade das trincas TL e TC dos padrões.

Em suma, os resultados parciais dos ensaios de correntes parasitas nos padrões de trincas circunferenciais e longitudinais, com sondas bobinas e calibração ASME, revelam que:

- Na condição fora do espelho a TL 50% e a TC 80% de profundidade produziram sinais de boa amplitude e apresentam alta detectabilidade. O limiar de detectabilidade, considerando uma amplitude de 0,5V, estaria na faixa de 30% para a TL e 50% para a TC, considerando as dimensões de trinca do padrão.
- Na condição dentro do espelho as amplitudes dos sinais são reduzidas. A TL 70% e a TC 90% de profundidade produzem sinais de boa amplitude e apresentam alta detectabilidade. O limiar de detectabilidade, considerando uma amplitude de 0,5V, estaria na faixa de 40% para a TL e 90% para as TC, considerando as dimensões de trinca do padrão.
- As TL foram melhor detectadas e discriminadas do que as equivalentes TC basicamente porque produziram sinais de maior amplitude. As sondas tipo bobina geram um fluxo de correntes parasitas no sentido circunferencial do tubo e que passa paralelamente a descontinuidade, sendo por esta razão menos perturbado pelas trincas circunferenciais.

4.4 DETECTABILIDADE DOS CORPOS DE PROVA COM TL E DE TC

Os corpos de prova com TL de 100% (CP 7), 50% (CP 8) e 20% (CP 9) e com TC de 100% (CP 10), 50% (CP 11) e 20% (CP 12), conforme figuras 3.7 à 3.12, foram ensaiados por correntes parasitas fora e dentro do espelho. Cada CP possuía 3 trincas inseridas na RE, na RT e na RNE, respectivamente. O comprimento da trinca de 5 mm visa representar as trincas usualmente detectadas no campo com os ensaios de correntes parasitas em tubos de trocadores de aço inoxidável austenítico na região do espelho, durante a operação do equipamento.

A figura 4.20 (a) mostra o registro de um ensaio de um ensaio de correntes e a confirmação da descontinuidade após a retirada do tubo e ensaio de LP na análise de falha conforme visualizado na figura 4.20(b). Estes tipos de trinca são típicas da RF e foram umas das referências para a confecção dos CP.

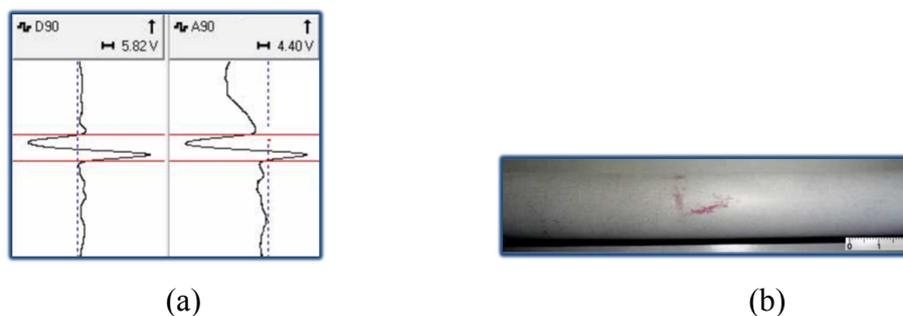


Figura 4.20 - Registro do sinal da trinca (a) e aspecto metalográfico (b)

Fonte: O autor (2013)

4.4.1 Corpo de prova TL 100%

A figura 4.21 representa de forma esquemática a localização das TL 100% do CP 7 (figura 3.7), o sentido de varredura utilizado e os registros do ensaio de correntes parasitas dentro e fora do espelho. Esta sistemática foi utilizada nos ensaios de correntes parasitas em todos os demais CP (8, 9, 10, 11 e 12), variando apenas a orientação da trinca (TL ou TC), a localização (RNE, RT ou RE) e sua profundidade (100%, 50% ou 20%). O CP 7 possui 3 TL 100% inseridas na RNE, RT e RE. Observa-se nos canais

D90 e A90 da carta de registro que é possível identificar o sinal da TL 100% independente da sua localização (RNE, RT e RE) e em ambas as condições, fora e dentro do espelho.

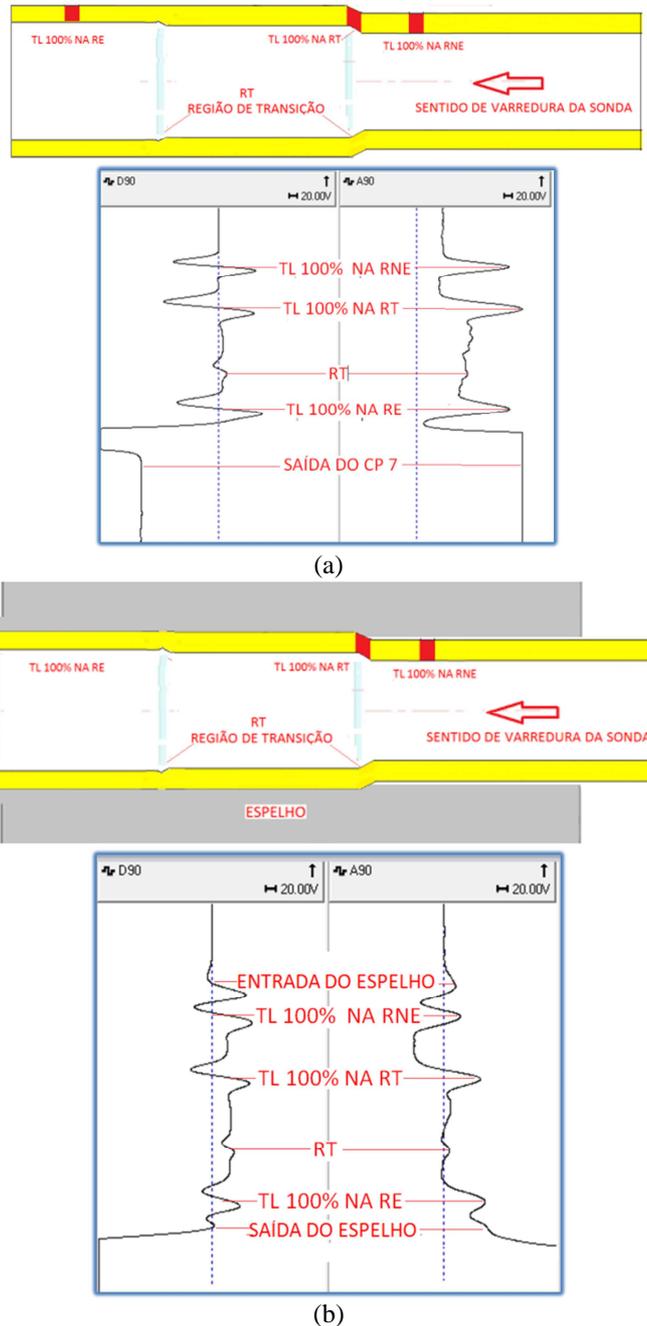


Figura 4.21 - Localização da TL 100%, esquema de varredura e registro dos sinais de correntes parasitas no CP 7

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho.

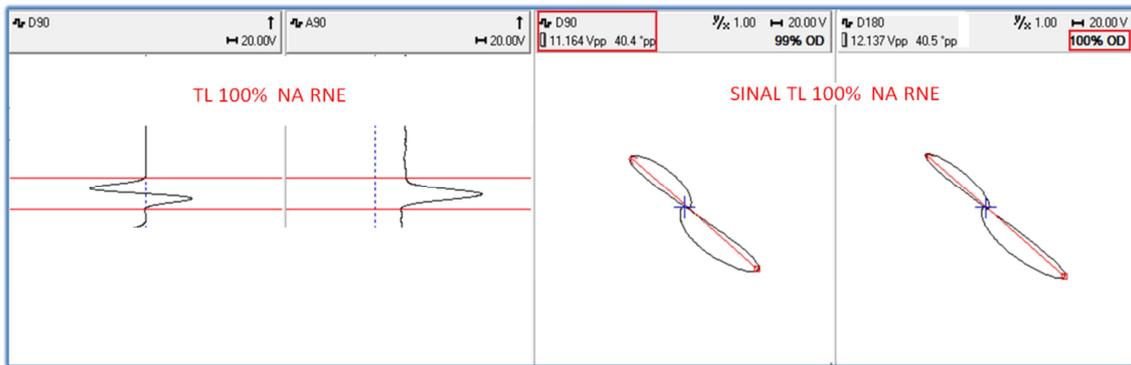
Fonte: O autor (2013).

A figura 4.21 mostra o sinal originado deste corpo de prova apenas da RT, onde se observa sua pequena amplitude comparada com as geradas pelos sinais das TL, independente da localização.

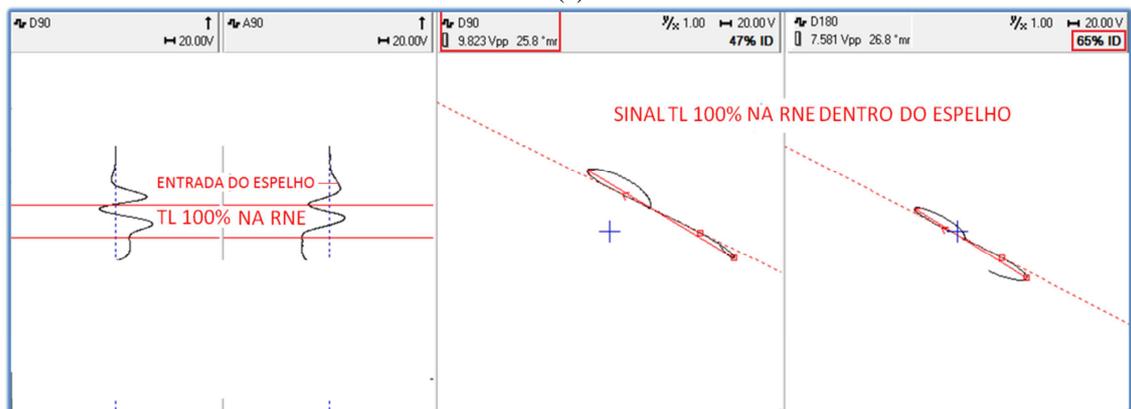
Para avaliar a detectabilidade nas diversas regiões do espelho os sinais das TL 100% da figura 4.21 foram discriminados e analisados individualmente, comparando os registros obtidos fora e dentro do espelho.

As figuras 4.22, 4.23 e 4.24 mostram o sinal da TL 100% em cada região específica (RNE, RT e RE respectivamente), repetindo o sinal da carta de registro, com os planos de impedância, na condição fora e dentro do espelho. A figura 4.22 (a) destaca o sinal da trinca TL 100% na RNE fora do espelho e mostra no plano de impedância do canal D90 o valor de 11,17 V para amplitude do seu sinal. Na figura 4.22 (b) observamos que o sinal da mesma trinca dentro do espelho teve sua amplitude reduzida para 9,245 V. Como este valor ainda é elevado, comparado com a referência de 1 V do padrão ASME, a presença do espelho não resultou em grande redução na amplitude dos sinais e portanto na detectabilidade do defeito. A presença do espelho não alterou inclusive as características do seu sinal, como pode ser visualizado no plano de impedância do canal D90. Desta forma podemos afirmar que uma TL 100%, apresenta alta detectabilidade na RNE, fora e dentro do espelho.

Em relação ao dimensionamento da mesma descontinuidade (TL 100%) dentro e fora do espelho pode-se observar que houve interferência do sinal de entrada do espelho no sinal obtido da descontinuidade, mostrando que a estimativa do dimensionamento de descontinuidades detectadas nesta região deve ser considerada crítica. O canal D180 fora do espelho indica uma profundidade de 100%. Dentro do espelho a profundidade indicada foi 65%, revelando um erro significativo.



(a)



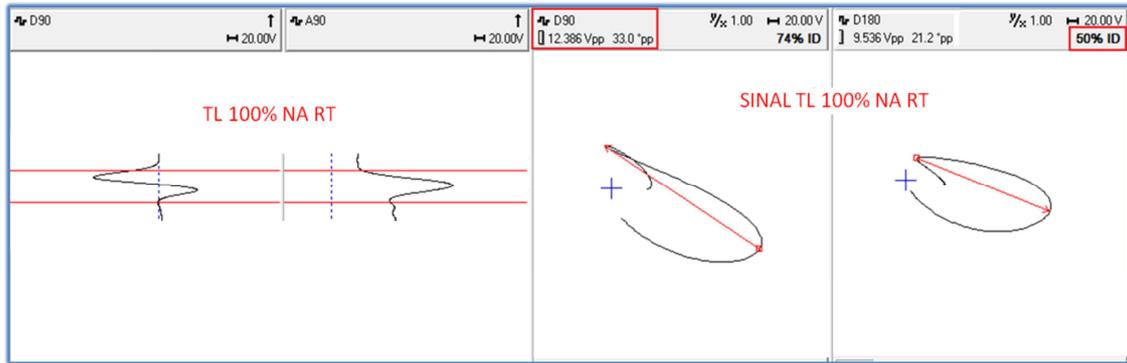
(b)

Figura 4.22 - Sinal da TL 100% na RNE

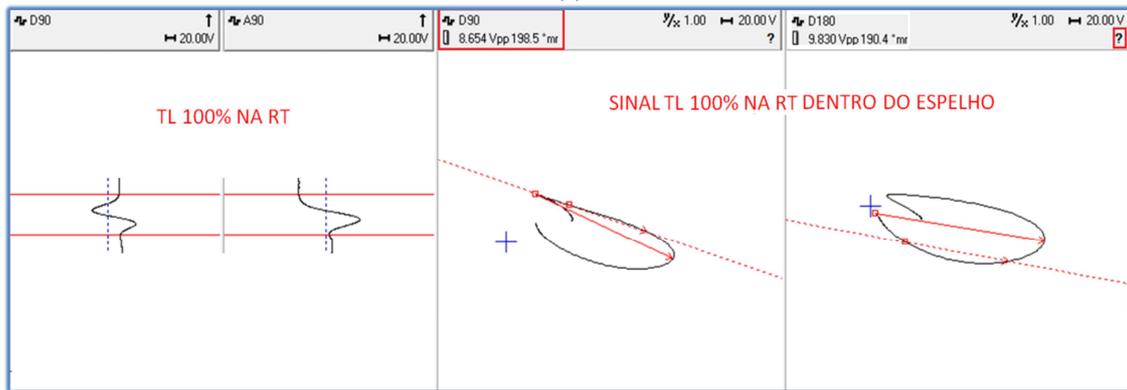
(a) fora do espelho (b) dentro do espelho

Fonte: O autor (2013)

A figura 4.23 (a) destaca o sinal da trinca TL 100% na RT fora do espelho e mostra no plano de impedância do canal D90 o valor de 11,97 V para amplitude do seu sinal. Na figura 4.23 (b) observamos que o sinal da mesma trinca dentro do espelho teve sua amplitude reduzida para 11,24 V. Como este valor também é elevado, comparado com a referência de 1 V do padrão ASME, a presença do espelho não afetou sua detectabilidade. A característica do seu sinal, visualizada no plano de impedância do canal D90, também não foi alterada. Desta forma podemos afirmar que uma TL 100% apresenta alta detectabilidade na RT, fora e dentro do espelho. Entretanto, os sinais da descontinuidade obtidos dentro e fora do espelho mostrou que o dimensionamento correto de sua profundidade foi prejudicado pela influência da deformação localizada gerada pela mandrilagem.



(a)



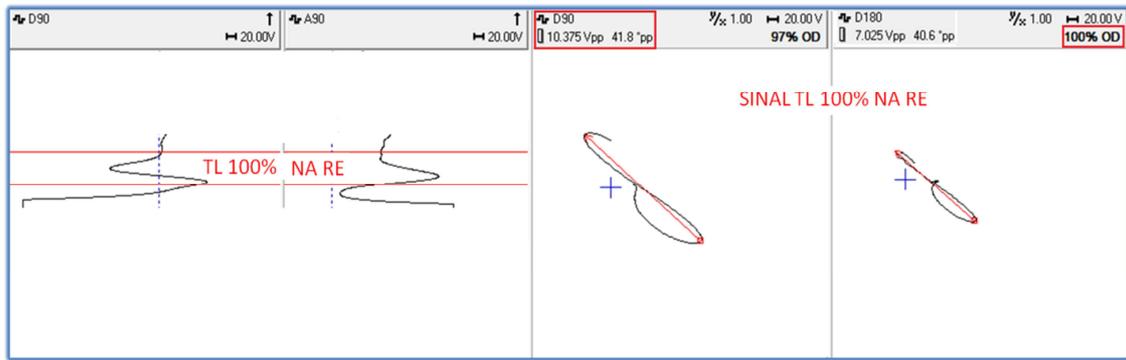
(b)

Figura 4.23 - Sinal da TL 100% na RT

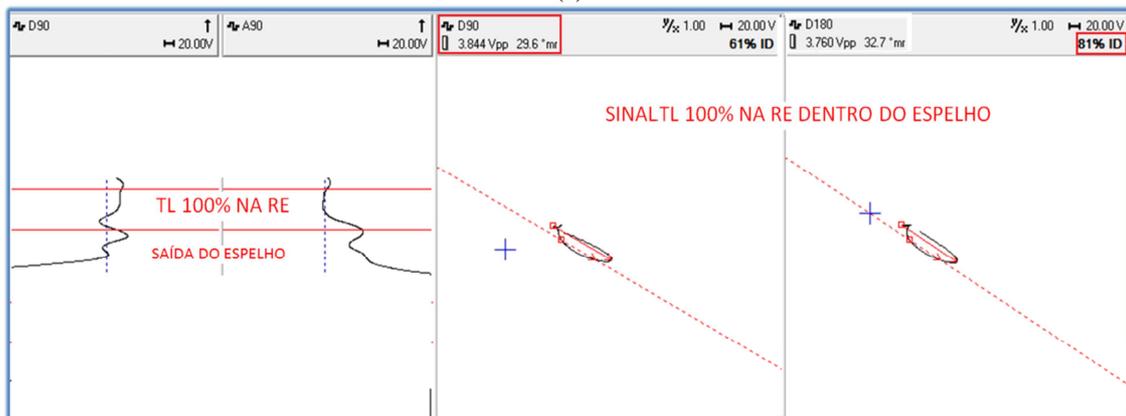
(a) fora do espelho (b) dentro do espelho

Fonte: O autor (2013)

A figura 4.24 (a) destaca o sinal da trinca TL 100% na RE fora do espelho e mostra no plano de impedância do canal D90 o valor de 10,375 V para amplitude do seu sinal. Na figura 4.24 (b) observamos que o sinal da mesma trinca dentro do espelho teve sua amplitude reduzida para 3,844 V. Como este valor também é elevado, comparado com a referência de 1 V do padrão ASME, a presença do espelho não afetou sua detectabilidade e as características do seu sinal, visualizadas no plano de impedância do canal D90. Desta forma podemos afirmar que uma TL 100%, apresenta alta detectabilidade na RE, fora e dentro do espelho.



(a)



(b)

Figura 4.24 - Sinal da TL 100% na RE

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho

Fonte: O autor (2013)

Esta alta detectabilidade das TL passantes é favorecida por dois aspectos importantes a serem considerados no ensaio de correntes parasitas. O primeiro é referente à elevada densidade de correntes parasitas que se concentram na superfície interna do tubo, próximo a bobina excitadora. Esta densidade diminui ao se afastar da bobina. As trincas mais profundas e principalmente as passantes conseguem perturbar este fluxos de correntes de alta densidade, resultando numa maior alteração na impedância da bobina. Por outro lado, as trincas mais superficiais, como será visto mais adiante, vão perturbar fluxos de correntes com menores densidades, que consequentemente resultarão em menores alterações na impedância da bobina.

O segundo aspecto é o favorecimento da orientação da TL em relação ao fluxo de correntes parasitas geradas pelas sondas bobinas internas, conforme mostrado na figura 2.2.9. Estas sondas geram fluxos paralelos que fluem circunferencialmente ao

tubo. Para a detectabilidade, é essencial que este fluxo esteja o mais perpendicular possível da descontinuidade. Por esta razão, as TL vão distorcer mais as linhas do fluxo de correntes parasitas do que as TC, causando maior alteração na impedância da sonda.

4.4.2 Corpo de prova TL 50%

A figura 4.25 mostra os registros dos sinais de correntes parasitas no CP 8 (figura 3.8), que possui três TL 50% inseridas na RNE, RT e RE, nas condições fora e dentro do espelho. Observa-se nos canais D90 e A90 da carta de registro a identificação de cada sinal. A figura 4.25 (a) revela o sinal apenas da RT, que é maior que o da TL 50% na RNE, isto é, a amplitude do sinal da TL 50% é menor que a amplitude do gerado apenas pela RT. Os resultados dos ensaios de correntes parasitas no CP 5 (figura - 3.5 padrão TL) apresentados no item 4.3.1 já indicavam um valor de baixa amplitude do sinal para TL, para esta faixa de profundidade. A figura 4.25 (b) exhibe todos os sinais gerados dentro do espelho, revelando menores amplitudes de sinais comparados a condição anterior.

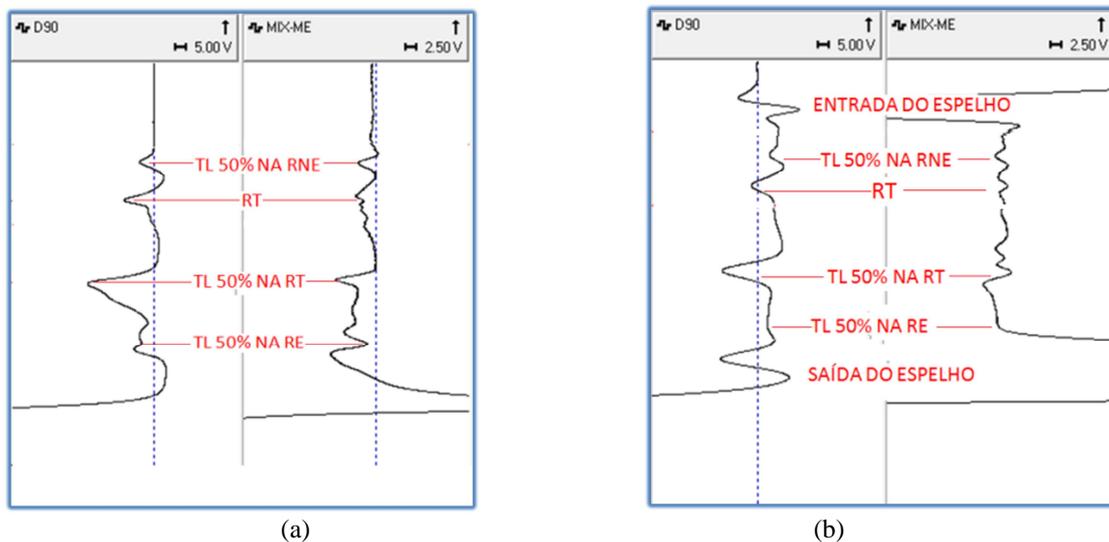


Figura 4.25 - Registro dos sinais de correntes parasitas no CP 8

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho.

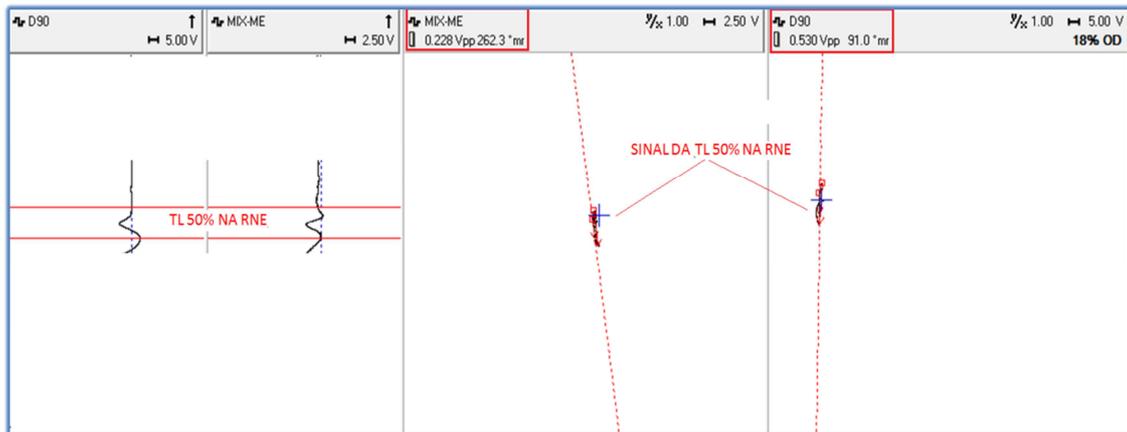
Fonte: O autor (2013)

Por esta razão, é necessário uma análise individualizada de cada sinal, para caracterizar isoladamente o sinal da TL 50% e compará-lo com os demais sinais dos efeitos geométricos. A figura 4.26 mostra os registros dos sinais da varredura do CP 8, na condição fora do espelho. A figura 4.26 (a) destaca apenas o sinal da trinca TL 50% na RNE, mostrando na carta de registro seu sinal no canal diferencial D90 e no canal MIXME, criado para mixagem do sinal da RT. Podemos observar que a amplitude do sinal da trinca TL 50% não é elevada, com valores de 0,530 V no canal D90 e 0,220 V no canal MIXME, não sendo, portanto um sinal de alta detectabilidade.

A figura 4.26 (b) mostra o sinal da TL 50% na RNE mais o sinal gerado pela RT, evidenciando no plano de impedância as características de cada sinal separadamente. O canal D90 da carta de registro mostra que com a adição do sinal da RT a amplitude indicada foi de 2,067 V, muito maior que o valor de 0,530 V do sinal da própria trinca isoladamente, registrado anteriormente. Por esta razão é difícil identificar e discriminar o sinal apenas do defeito no plano de impedância do canal D90.

A figura 4.26 (b) também exhibe na carta de registro que o sinal da RT é quase que totalmente suprimido no canal MIXME. Com a supressão deste sinal, o sinal resultante é apenas o sinal característico do defeito. Embora a amplitude do sinal mixado seja menor que o sinal original do canal D90, ele é representativo da trinca TL 50%. Desta forma, embora seja um sinal de baixa amplitude (0,253 V) e de difícil detecção, é mais adequado utilizar este canal mixado para discriminar os sinais sobrepostos.

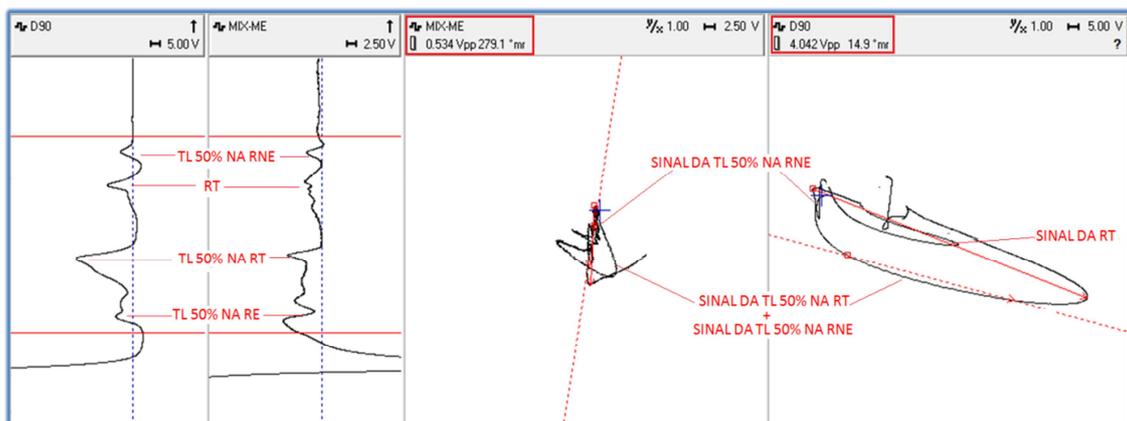
A figura 4.26 (c) revela os sinais da TL 50% na RNE, da RT, da TL 50% na RT e da TL 50% na RNE, evidenciando no plano de impedância as características de cada sinal separadamente. Observa-se que cada sinal tem uma assinatura característica. Porém não é fácil numa inspeção de campo conseguir identificar e caracterizar a origem destes sinais sobrepostos. Esta identificação neste estudo foi facilitada pelo conhecimento dos defeitos e demais efeitos geométricos inseridos em cada região do CP.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.26 - (a) (b) (c) Sequência de registros do CP7 TL 50% fora do espelho

Fonte: O autor (2013)

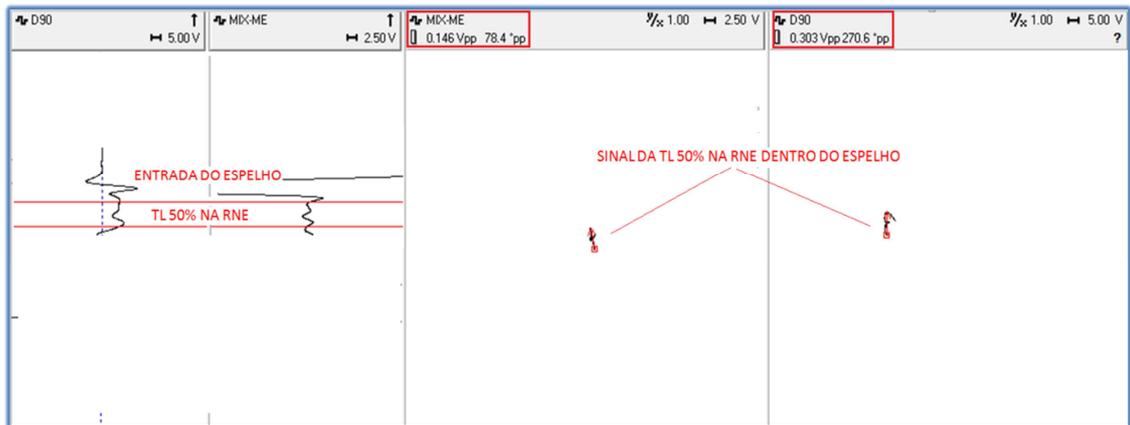
A figura 4.27 mostra os registros dos sinais da varredura do CP 8 (TL 50%), mas agora dentro do espelho. A principal influência da presença do espelho se reflete na redução das amplitudes dos sinais das discontinuidades, aumentando sua dificuldade de detecção. Podemos observar na carta de registro da figura 4.27 (a), comparando com a

figura 4.26 (a) que a amplitude do sinal da trinca TL 50% na RNE foi reduzida tanto no canal D90 (de 0,530 V fora do espelho para 0,303 V dentro do espelho) como no canal MIXME (de 0,228 V fora do espelho para 0,146 V dentro do espelho).

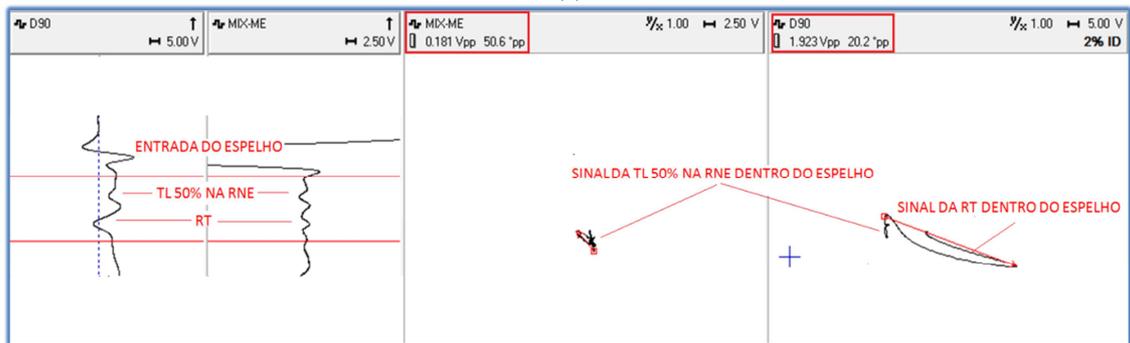
A figura 4.27 (b) exibe o sinal da TL 50% na RNE mais o sinal gerado pela RT, evidenciando no plano de impedância as características de cada sinal separadamente. Podemos observar na carta de registro que a amplitude deste sinal também foi reduzida, tanto no canal D90 (de 2,067 V fora do espelho para 1,923 V dentro do espelho) como no canal MIXME (de 0,253 V fora do espelho para 0,181 V dentro do espelho).

A figura 4.27 (c) apresenta os sinais da TL 50% na RNE, da RT, da TL 50% na RT e da TL 50% na RNE, evidenciando no plano de impedância as características de cada sinal separadamente. Observa-se também a redução de amplitude tanto no canal D90 (de 4,042 V fora do espelho para 3,910 V dentro do espelho) como no canal MIXME (de 0,534 V fora do espelho para 0,181 V dentro do espelho).

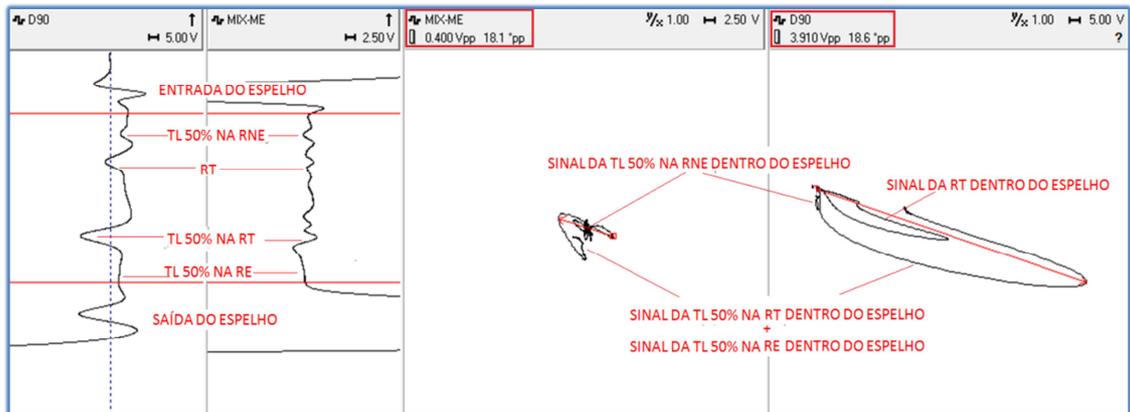
Conclui-se, portanto que uma TL 50% é detectável com a sonda bobina interna. Porém a análise dos sinais vai exigir uma avaliação mais criteriosa, com a utilização de aparelhagem que permita utilizar os recursos de mixagem de sinais, além de um elevado grau de habilidade do analista. A análise dos sinais produzidos dentro do espelho é dificultada pela presença de uma quantidade maior de sinais espúrios característicos desta região, como a entrada e saída do espelho, mandrilagem, frestas, depósitos condutores, depósitos magnéticos, etc. Com os recursos utilizados e devido às baixas amplitudes obtidas dos sinais da TL 50% esta profundidade se evidencia como seu limiar de detectabilidade, independente da sua localização, fora e dentro do espelho. Seguindo esta tendência, trincas mais superficiais apresentarão, como será visto mais adiante, dificuldade de detecção ainda maior.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.27 - (a) (b) (c) Sequência de registros do CP8 TL 50% dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

4.4.3 Corpo de prova TL 20%

A figura 4.28 mostra os registros dos sinais de correntes parasitas no CP 9 (figura 3.9), que possui três TL 20% inseridas na RNE, RT e RE, nas condições fora e dentro do espelho. A figura 4.28 (a) revela, no canal D 90 da carta de registro, o sinal da

TL 20% na RT, o sinal da RT, quase não se observa o sinal da TL 20% na RNE e não se evidencia nenhum sinal da TL20% na RE. O canal mixado MX1 revela apenas o sinal resultante da mixagem da RT, não se evidenciando sinal da TL 20% em nenhuma região. A figura 4.28 (b) indica, nos canais D90 e A90 da carta de registro, que dentro do espelho também não é possível identificar o sinal da TL 20% na RNE e na RE, provavelmente devido à suas baixas amplitudes comparadas a referência de 1 V. É possível identificar apenas o sinal referente a TL 20% na RT e o sinal da própria RT.

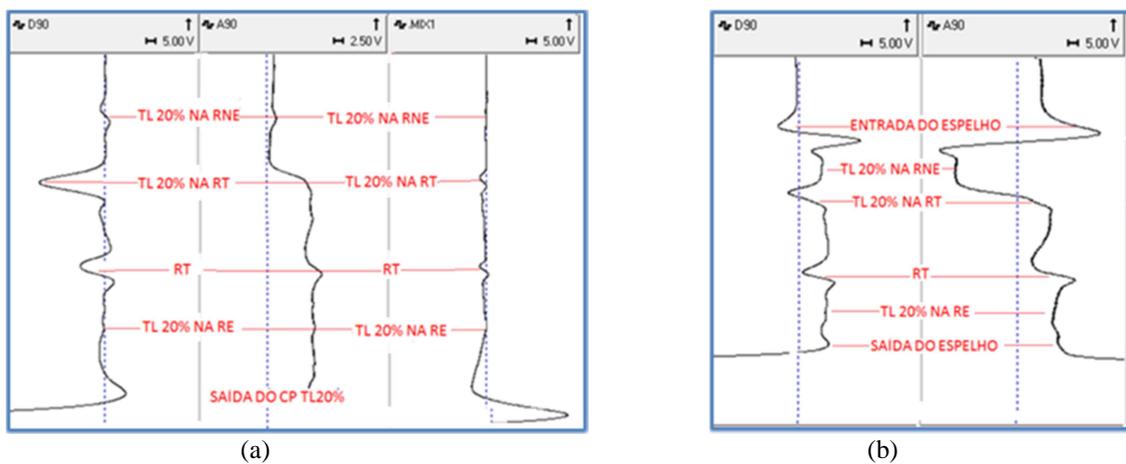


Figura 4.28 - Registro dos sinais de correntes parasitas no CP9

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.29 (a) destaca na carta de registro o sinal referente à TL 20% na RNE fora do espelho e os planos de impedância, que confirmam os baixos valores de amplitude deste sinal no canal D90 (0,274 V) e no canal MX1 (0,054 V). A figura 4.29 (b) indica que fora do espelho o sinal da TL 20% na RT apresenta um valor de 6,400 V no plano de impedância do canal D90 e de 0,234 V no canal MIXME. Analisando o plano de impedância não observamos o sinal característico da trinca TL20% na RT. O sinal resultante possui característica típica de variação causada pelo afastamento sonda peça (*lift-off*), típica da RT.

Estes baixos valores de amplitudes da TL 20% são em função da sua pequena profundidade, que interage e distorce as linhas de fluxos de correntes parasitas de baixa densidade, resultando numa pequena alteração na impedância da sonda. Por esta razão podemos afirmar que uma TL 20% apresenta uma baixa detectabilidade, independente

da sua localização, fora e dentro do espelho e está, sem dúvida, abaixo do limiar de detecção para as TL usadas neste estudo.

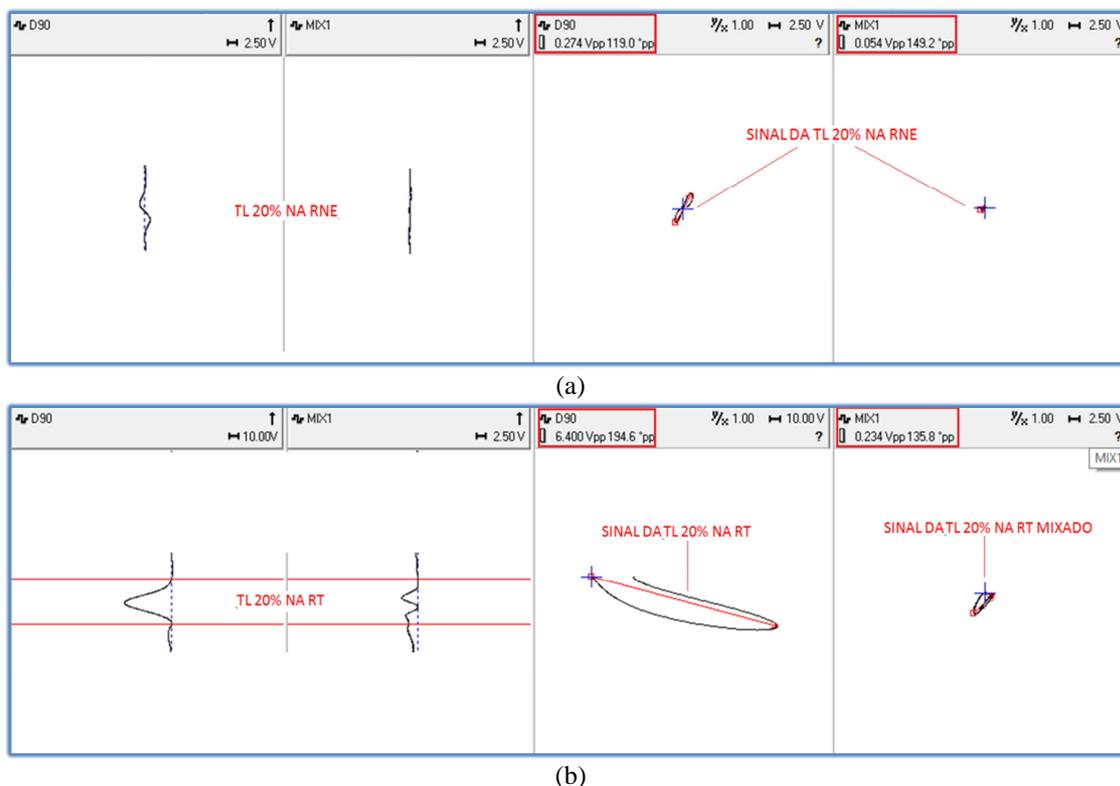


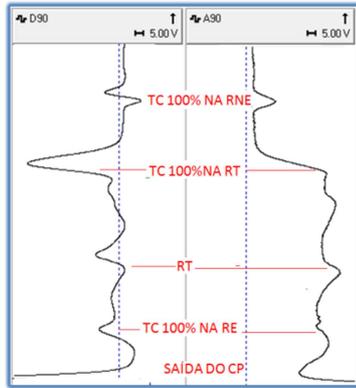
Figura 4.29 - Sinal da TC 50% na RNE (a) e RT fora do espelho

Fonte: O autor (2013).

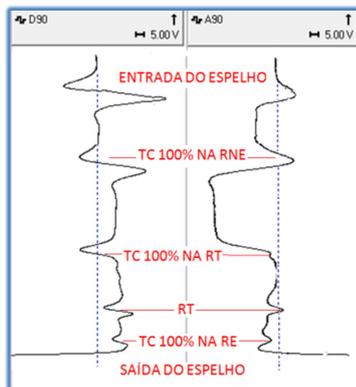
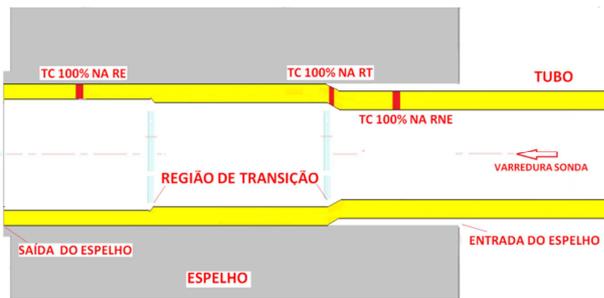
4.4.4 Corpo de prova TC 100%

A figura 4.30 mostra os registros dos sinais de correntes parasitas no CP 10 (figura 3.10), que possui 3 TC 100% inseridas na RNE, RT e RE, nas condições fora e dentro do espelho. Observa-se nos canais D90 e A90 da carta de registro que é possível identificar o sinal da TC 100% independente da sua localização e em ambas as condições. Portanto a detectabilidade da TC 100% na RNE, RT e RE se mantém dentro do espelho.

A figura 4.30 (a) também revela o sinal originado apenas da RT, onde se observa visualmente que sua amplitude é semelhante as geradas pelos sinais das TC 100% na RNE e na RE.



(a)



(b)

Figura 4.30 - Registro dos sinais de correntes parasitas no CP 10

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho.

Fonte: O autor (2013).

As figuras 4.31, 4.32 e 4.33 mostram o sinal da TC 100% em cada região específica (RNE, RT e RE respectivamente), com os planos de impedância, na condição fora e dentro do espelho. A figura 4.31 (a) destaca o sinal da trinca TC 100% na RNE fora do espelho e mostra no plano de impedância do canal D90 o valor de 1,293 V para amplitude do seu sinal. Na figura 4.31 (b) observamos que o sinal da mesma trinca dentro do espelho teve sua amplitude reduzida para 1,075 V. Como este valor ainda é maior que a referência de 1 V do padrão ASME e a presença do espelho não resultou em grande redução na sua amplitude e sua detectabilidade também foi mantida. A presença do espelho não alterou inclusive as características do seu sinal, como pode ser visualizado no plano de impedância do canal D90 em ambas as condições. Desta forma podemos afirmar que uma TC 100% apresenta boa detectabilidade na RNE, fora e dentro do espelho.

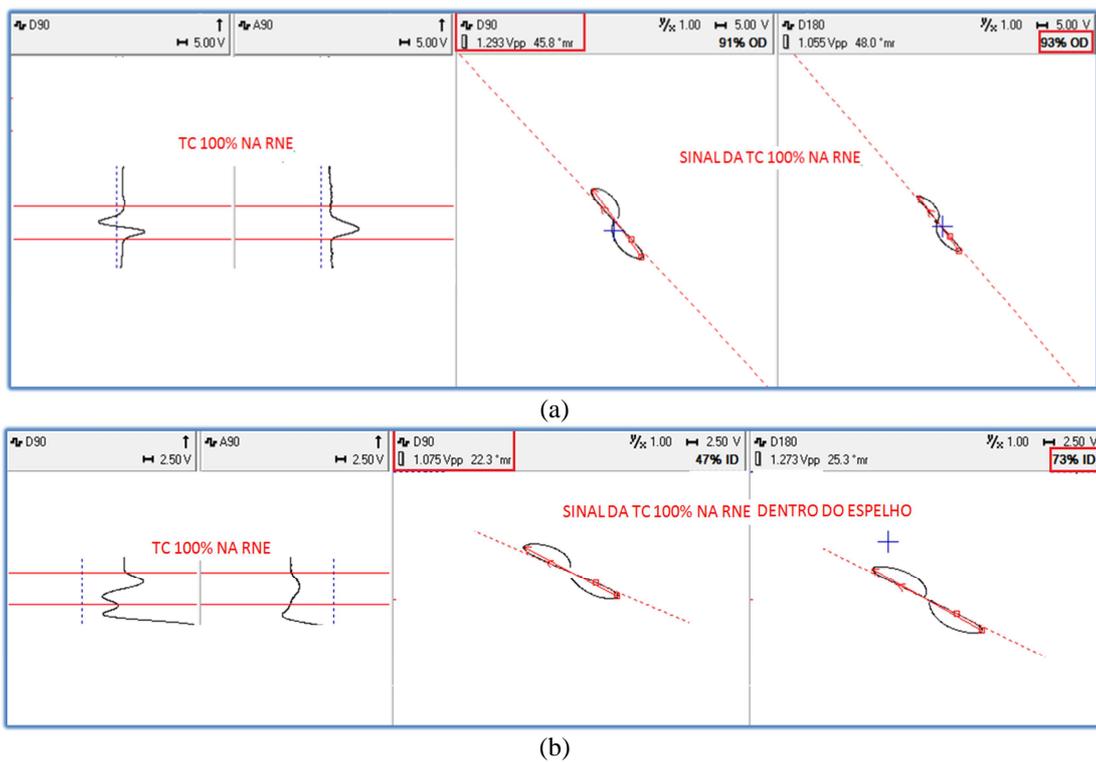


Figura 4.31 - Sinal da TC 100% na RNE

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho.

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.32 destaca na carta de registro o sinal referente a TC 100% na RT fora e dentro do espelho. A figura 4.32 (a) indica que fora do espelho o sinal da TC 100% na RT apresenta um valor de 5,910 V no plano de impedância do canal D90. A figura 4.32 (b) revela que dentro do espelho a amplitude do sinal da TC 100% na RT é reduzido para um valor de 5,770 V no plano de impedância do canal D90. No canal mixado MIXME o sinal da RT foi suprimido e a amplitude do sinal apenas da TC 100% foi reduzida para 0,663 V. Como este valor é menor que a referência de 1 V do padrão ASME a presença do espelho reduziu um pouco sua detectabilidade.

Desta forma podemos afirmar que uma TC 100% apresenta boa detectabilidade na RT fora do espelho e média detectabilidade dentro do espelho. Porém há necessidade de mixagem do sinal, suprimindo o sinal da RT e permitindo avaliar o sinal da própria trinca.

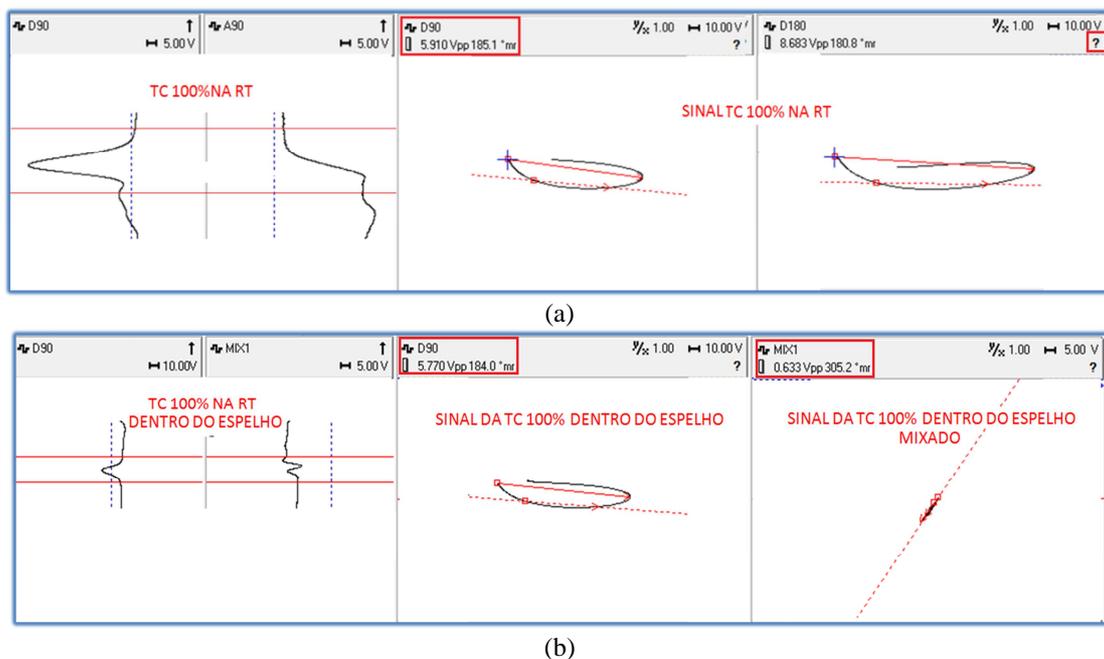


Figura 4.32 - Sinal da TC 100% na RT

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho.

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.33 (a) destaca o sinal da trinca TC 100% na RE fora do espelho e mostra no plano de impedância do canal D90 o valor de 1,066 V para amplitude do seu sinal. Na figura 4.33 (b) observamos o sinal da mesma trinca dentro do espelho teve sua

amplitude reduzida para 0,761 V. Como este valor é menor que a referência de 1 V do padrão ASME, a presença do espelho reduziu pouco sua detectabilidade.

Desta forma podemos afirmar que uma TC 100% na RE apresenta boa detectabilidade na RT fora do espelho e média dentro do espelho.

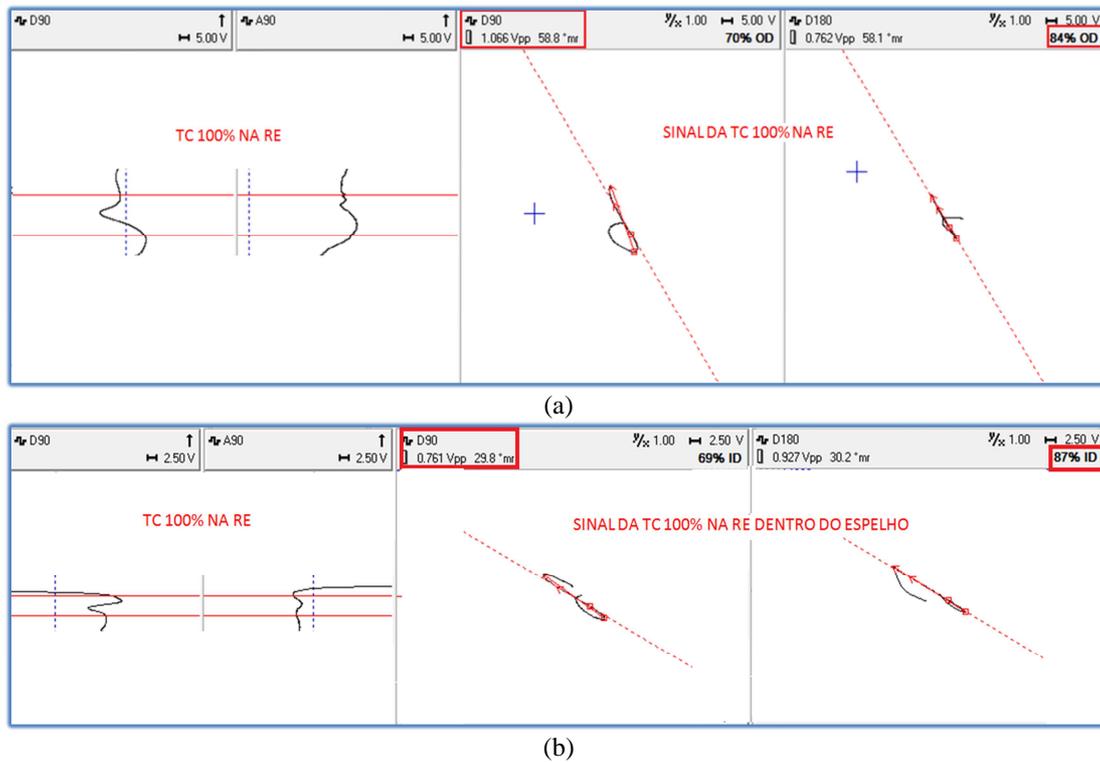


Figura 4.33 - Sinal da TC 100% na RE

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho.

Fonte: O autor (2013).

4.4.5 Corpo de prova TC 50%

A figura 4.34 mostra os registros dos sinais de correntes parasitas no CP 11 (figura 3.11), que possui três TC 50% inseridas na RNE, RT e RE, nas condições fora e dentro do espelho. Observa-se nos canais D90 e A90 da carta de registro a identificação de cada sinal. A figura 4.34 (a) revela um sinal da RT maior que o sinal da TL 50% na RNE, isto é, a amplitude do sinal da TC 50% é menor que a amplitude do sinal gerado apenas pela RT. Os resultados dos ensaios de correntes parasitas no CP 6 (figura 3.6 - padrão TC) apresentados no item 4.3.2 já indicavam um valor de baixa amplitude do

sinal para TC, para esta faixa de profundidade. A figura 4.34 (b) exhibe todos os sinais gerados dentro do espelho, revelando menores amplitudes de sinais comparados a condição anterior, dificultando inclusive identificar no canal MX1 sinais que possam ser associados a TC 50% na RNE, RT e RNE.

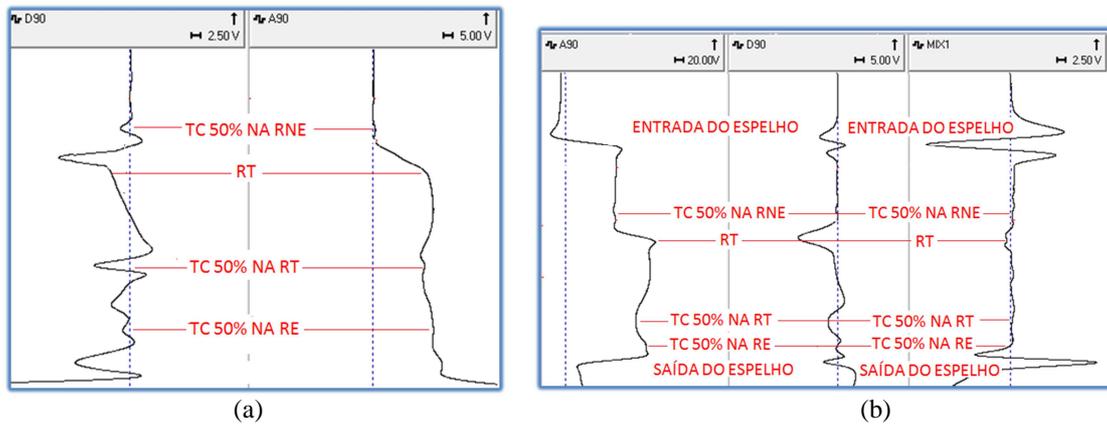
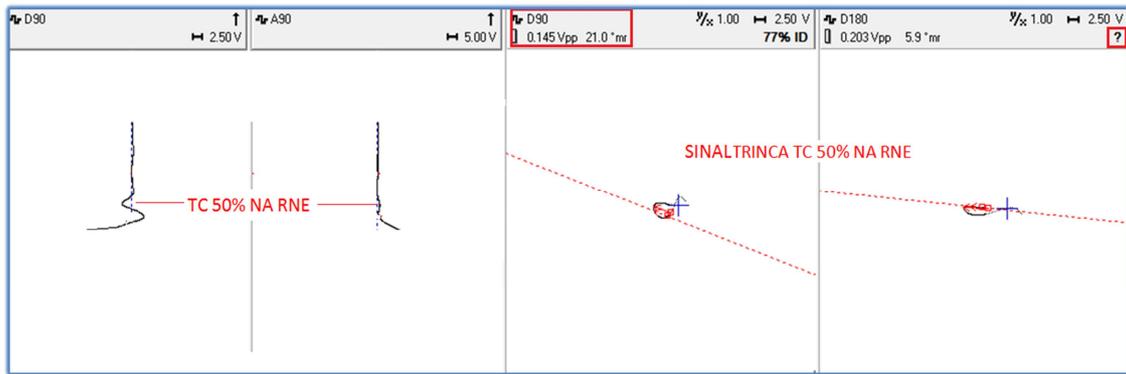


Figura 4.34 - Sinais de correntes parasitas no CP 11

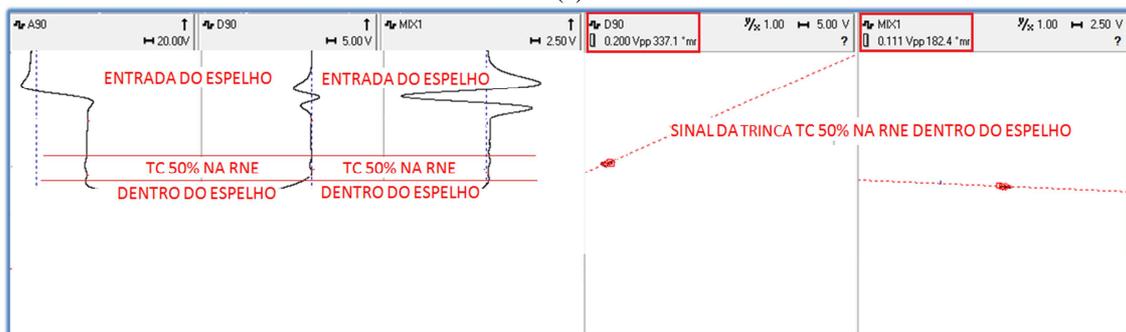
(a) fora do espelho (b) dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.35 (a) destaca apenas a TC 50% na RNE fora do espelho, mostrando seu sinal no canal D90 e A90 na carta de registro. O plano de impedância do canal D90 revela uma amplitude muito baixa (0,145 V), comparada a referência de 1V, sendo um sinal de baixa detectabilidade. A figura 4.35 (b) mostra na carta de registro o sinal da TC 50% na RNE nos canais A90, D90 e no canal MX1, criado para suprimir o sinal da RT. Devido a baixa amplitude do sinal da TC 50% dentro do espelho temos inclusive dificuldade de identificar o seu sinal em todos estes canais. O plano de impedância do canal D90 mostra que o sinal da TC 50% na RNE dentro do espelho se mantém com baixos valores de amplitudes (0,200 V no canal D90 e 0,111 V no canal MX1), dificultando sua detecção.



(a)



(b)

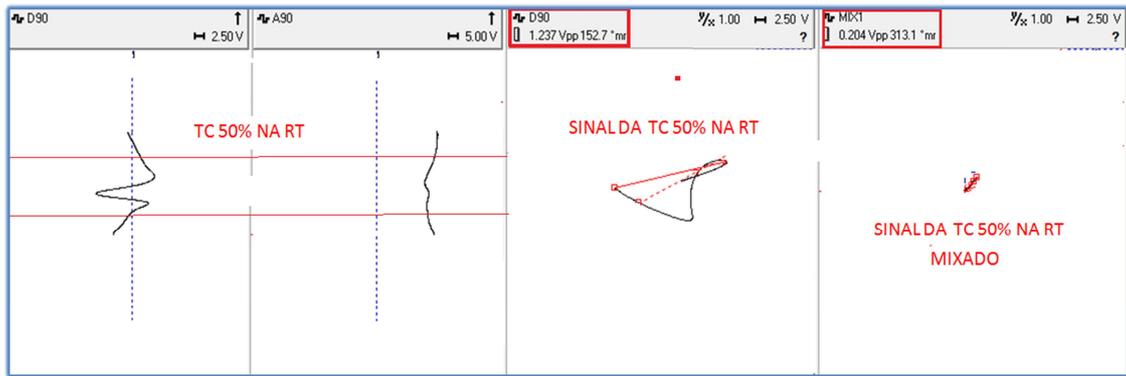
Figura 4.35 - Sinal da TC 50% na RNE

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho

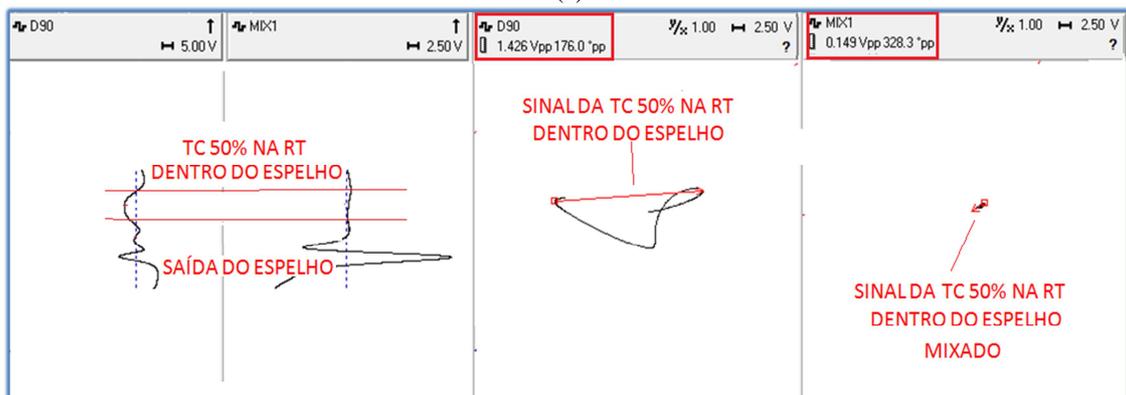
Fonte: O autor (2013).

A figura 4.36 (a) destaca apenas a TC 50% na RT fora do espelho, mostrando seu sinal no canal D90 e A90 na carta de registro. O plano de impedância do canal D90 revela um sinal da TC 50% na RT com amplitude de 1,237 V. No plano de impedância do canal MIX este valor foi reduzido para 0,204 V, com a supressão do sinal da RT. Este valor de amplitude é baixo, comparado a referência de 1 V, sendo considerado um sinal de baixa detectabilidade.

A figura 4.36 (b) destaca apenas a TC 50% na RT dentro do espelho, mostrando seu sinal no canal D90, que é quase que totalmente suprimido no canal MX1. O plano de impedância do canal D90 revela um sinal da TC 50% na RT dentro do espelho com amplitude de 1,426 V. No plano de impedância do canal MIX este valor é reduzido para 0,149 V, com a supressão do sinal da RT. Este valor de amplitude é baixo, comparado a referência de 1V, sendo considerado um sinal de baixa detectabilidade. Então, conclui-se que nem com a mixagem e supressão da RT, a TC50% dentro do espelho é detectável.



(a)



(b)

Figura 4.36 - Sinal da TC 50% na RT

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho.

Fonte: O autor (2013).

O sinal da TC 50% na RE fora do espelho tem o mesmo comportamento da TC 50% na RNE. A figura 4.37 destaca a TC 50% na RE dentro do espelho, mostrando um sinal de pequena amplitude no canal D90, que é quase que totalmente suprimido no canal MX1. Como estamos próximo a saída do espelho existe uma dificuldade de selecionar o sinal que seja representativo apenas da TC 50% na RE. O sinal no plano de impedância também não apresenta característica de trinca. O plano de impedância do canal D90 revela para o sinal selecionado uma amplitude de 0,796 V. No plano de impedância do canal MIX este valor é reduzido para 0,453 V, com a supressão do sinal da RT. Este valor de amplitude também pode ser considerado baixo, comparado a referência de 1V. Desta forma o sinal da TC 50% na RE fora e dentro do espelho pode ser considerado de baixa detectabilidade.



Figura 4.37 - Sinal da TC 50% na RE dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

A detectabilidade da TC 50% é menor comparada a TL 50% em função da sua orientação paralela ao fluxo de correntes induzidas na superfície do tubo pela sonda bobina. Conforme mostrado na figura 2.2.9 esta orientação não é favorável à distorção das linhas do fluxo de correntes circunferencial gerado pela sonda bobina. Quanto menor a profundidade da descontinuidade externa menor a interação com fluxos de correntes induzidas de alta densidade e menor a alteração da impedância da bobina. Na superfície interna do tubo, próxima a bobina, temos uma elevada densidade de corrente que diminui exponencialmente ao afastarmos para a superfície externa do tubo. Por esta razão podemos afirmar que uma TC 50%, apresenta uma baixa detectabilidade, independente da sua localização, fora e dentro do espelho.

4.4.6 Corpo de prova TC 20%

A figura 4.38 mostra os registros dos sinais de correntes parasitas no CP 12 (figura 3.12), que possui três TC 20% inseridas respectivamente na RNE, RT e RE, nas condições fora e dentro do espelho. A figura 4.38 (a) revela nos canais D90 da carta de registro que não é possível identificar o sinal da TC 20% na RNE e na RE. É possível identificar apenas o sinal referente à TC 20% na RT e da própria RT. Estes sinais visualmente apresentam amplitudes semelhantes neste canal (D90). Na carta de registro do canal MX1 é possível observar que após a mixagem do sinal da RT e o sinal da TC

20% na RT foram completamente suprimidos. Portanto, o sinal da TC20% na RT tinha pouca contribuição da TC 20% devido a sua baixa amplitude.

A figura 4.38 (b) ilustra os sinais da TC 20% dentro do espelho, com a mesma aparência já revelada fora do espelho. Os registros no canal MIX mostra apenas o sinal da entrada e saída do espelho, não tendo indício algum de sinal que poderia estar associado a TC 20%, independente da sua localização.

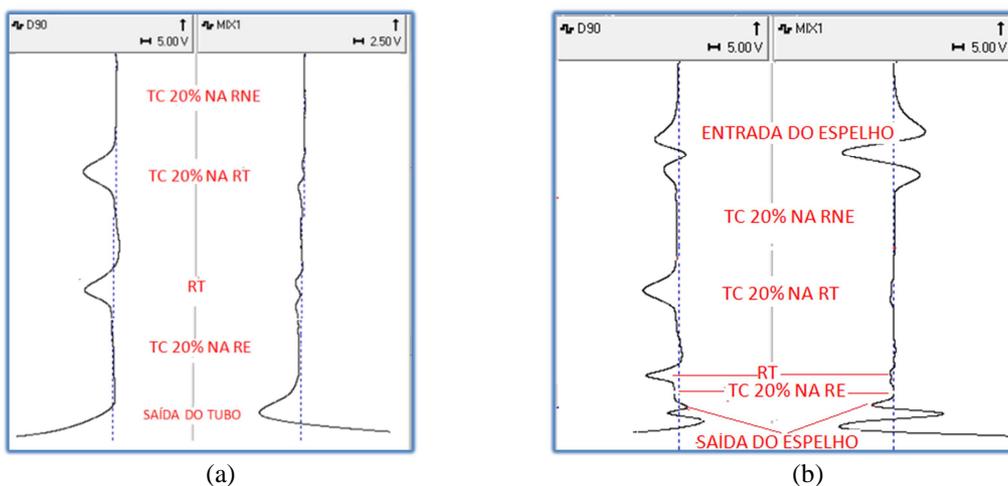


Figura 4.38 - Registro dos sinais de correntes parasitas no CP 12

(a) fora do espelho (b) dentro do espelho.

Fonte: O autor (2013).

As TC20% do CP12 não foram detectadas fora e dentro do espelho. Os baixos valores de amplitudes da TC 20% são função da sua pequena profundidade e da sua orientação não favorável ao fluxo de correntes induzido pela bobina. Ela interage e distorce muito pouco estes fluxos de correntes, sendo que estes são de baixa densidade, próximo a superfície externa do tubo. Isto resulta numa alteração insignificante na impedância da sonda. Por esta razão, podemos afirmar que uma TC 20% apresenta uma baixa detectabilidade, independente da sua localização, fora e dentro do espelho.

Como considerações parciais, os resultados dos ensaios de correntes parasitas com sondas bobina internas nos corpos de prova com TL e TC, inseridas nas várias regiões do espelho (figura 4.1), revelaram que:

- A região T fora do espelho é a que apresenta menos interferência de sinais indesejáveis, sendo a que apresenta melhor detectabilidade.

- Na RNE a detectabilidade é reduzida em relação a região T em função da menor amplitude dos sinais dentro do espelho. Há necessidade de mixar o sinal se a descontinuidade no tubo estiver na entrada do espelho.
- A RT produz um sinal de grande amplitude que sobrepõe o sinal das descontinuidades aí localizadas. Descontinuidades que geram sinais de grandes amplitudes, no nosso estudo as trincas profundas, não são difíceis de serem detectáveis nesta região. Trincas superficiais e sob a RT necessitam de mixagem para se discriminar e caracterizar o sinal com confiabilidade, sendo por esta razão de mais difícil detecção.
- Devido ao fluxo de correntes induzidas ser paralelo à superfície do tubo, as trincas longitudinais produzem sinais de maior amplitude, o que melhora sua detectabilidade em relação às similares TC (figura 2.2.9).
- As TL 50% e as TC 50% apresentam dificuldades significativas de discriminação quando localizadas tanto fora como dentro do espelho, em especial sobre a RT.
- Na RE, fora da EE, da SE e da RT, a sonda já está novamente balanceada, não tendo sinais espúrios de grandes amplitudes para mixagem. Adicionalmente aos resultados aqui apresentados cabe ressaltar outros problemas nas montagens que utilizam ranhuras, pois os sinais nesta região terão a influência do sinal da própria ranhura e da deformação plástica do tubo na ranhura. Esta deformação pode alterar as fases microestruturais por encruamento e conseqüentemente as propriedades magnéticas localizadas, que são de grande relevância no ensaio de correntes parasitas. Na saída do espelho o efeito de borda vai interferir na detectabilidade de descontinuidades nessa região. Não foi objeto de estudo neste trabalho avaliar estas influências, mas apenas identificá-las.

4.5 SONDAS MISTAS *PANCAKES*

Os resultados obtidos com a sonda bobina convencional e apresentados nos itens 4.3 e 4.4 mostram que este modelo de sonda apresenta uma menor detectabilidade para descontinuidades circunferenciais. Como já mencionado isto é devido ao fluxo de correntes induzidas pela bobina na superfície do tubo ser circunferencial e paralelo a este tipo de descontinuidade. As sondas mistas *Pancake* objetivam aumentar a detectabilidade deste tipo de descontinuidade (TC), inserindo, além da sonda bobina,

um arranjo de sondas superficiais que geram fluxos de correntes concêntricas e localizadas, sendo mais sensível a direção da descontinuidade circunferencial. Como interagem em menores áreas do tubo a sonda superficial sente muito pouco o efeito do espelho e da RT, facilitando a interpretação dos sinais nestas regiões sem necessidade de mixagem, como será visto mais adiante.

A figura 4.39 exhibe os registros dos sinais de correntes parasitas na calibração do CP 4 (figura 3.4), padrão ASME, utilizando a sonda *Pancake*. Conforme já mencionado no item 3.2.2.2, esta sonda permite obter em uma única varredura sinais com bobinas e com sondas superficiais. A carta de registro revela que os sinais da bobina estão registrados no canal D90 e os da sonda superficial no canal AC. Observa-se uma maior sensibilidade da sonda superficial ao sinal da ranhura interna de 10%, comparada à bobina. A amplitude deste sinal pode ser visualizada no plano de impedância. No canal AC da sonda superficial o valor indicado foi de 9,48 V, maior que o registrado no canal D90 da sonda bobina foi de 3,75V. Exceto o sinal da ranhura interna, os demais sinais das outras descontinuidades do padrão ASME são melhor detectados com a bobina.

A sonda superficial perde sensibilidade a medida que as descontinuidades ficam mais afastadas da superfície interna, chegando a não detectar o sinal dos 4 furos externos de 20%, que foi facilmente detectado pela bobina. A sonda *Pancake* se mostra muito sensível a descontinuidades internas e detecta apenas descontinuidades a partir do furo de 40% do padrão ASME. Desta forma, a sonda *Pancake* melhora a detectabilidade das descontinuidades internas e também daquelas mais profundas e próximas à sonda.

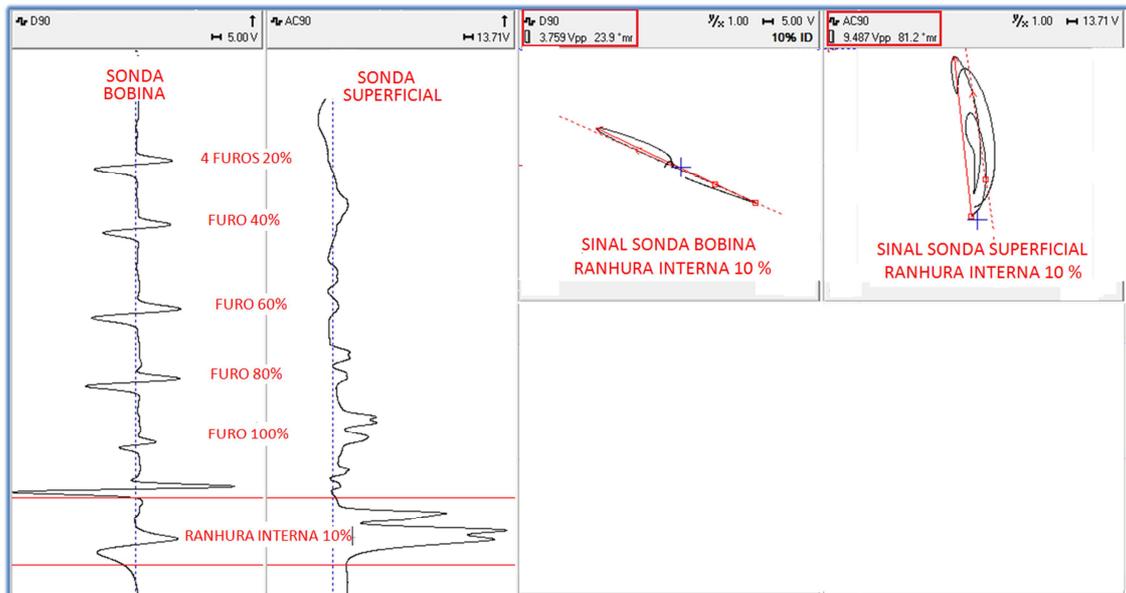


Figura 4.39 - Sinais das descontinuidades do Padrão ASME com a sonda *Pancake*

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.40 mostra o registro dos sinais no ensaio de correntes parasitas com a sonda *Pancake* no CP 6 (padrão TC- figura 3.6), destacando o sinal da TC 60% dentro do espelho. Podemos observar na carta de registro que o sinal da bobina no canal D90 e o sinal da sonda superficial no canal AC. Observamos uma maior sensibilidade da sonda superficial na detectabilidade do sinal da TC 60% comparada a bobina. Nota-se também que o sinal da sonda AC é defasado do sinal da bobina, fato que é devido ao próprio aspecto construtivo da sonda onde a sonda superficial passa primeiro sobre a descontinuidade e depois a sonda bobina (figura 3.15).

O plano de impedância da figura 4.40 mostra o sinal da TC 60% no canal AC da sonda superficial e no canal D90 da sonda bobina. A maior sensibilidade é corroborada avaliando os dois sinais agora no plano de impedância, que não é bem visualizado no canal D90 da bobina e se apresenta característico no canal AC da sonda superficial.



Figura 4.40 - Sinal da TC 60% do padrão com a sonda *Pancake* dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.41 (a) mostra o registro dos sinais no ensaio de correntes parasitas com a sonda *Pancake* no CP 10 (figura 3.10), destacando o sinal da TC 100% na RNE fora do espelho. Podemos observar na carta de registro os sinais da bobina no canal D90 e os da sonda superficial no canal AC, que ambas as sondas possuem uma boa sensibilidade para esta profundidade da TC. A amplitude deste sinal na sonda bobina pode ser visualizada no canal D90 do plano de impedância e indica um valor de 1,293 V, indicando boa detectabilidade com a sonda bobina na TC100%.

A figura 4.41 (b) mostra o registro dos sinais no ensaio de correntes parasitas com a sonda *Pancake* no CP 10, destacando o sinal da TC 100% na RT dentro do espelho. Podemos observar na carta de registro o sinal da sonda superficial no canal AC apresentou uma sensibilidade um pouco maior comparada a sonda bobina para esta profundidade da TC.

A figura 4.41 (c) mostra o registro dos sinais no ensaio de correntes parasitas com a sonda *Pancake* no CP 11 (figura 3.11), destacando o sinal da TC 50% na RT dentro do espelho. Podemos observar na carta de registro que a sonda superficial no canal AC possui uma maior sensibilidade comparada a sonda bobina para esta profundidade da TC (50%).

A figura 4.41 (d) mostra o registro dos sinais no ensaio de correntes parasitas com a sonda *Pancake* no mesmo CP 12 (figura 3.12) destacando a TC 20% na RNE e RT dentro do espelho. Podemos observar que pela carta de registro que tanto o canal D90 (bobina) quanto o canal AC 180 (superficial) não revelam sinais que possam ser indicativos da TC 20% tanto na RNE como na RT. Este resultado vem confirmar que a

sonda *Pancake* se mostra muito sensível a descontinuidades internas, próximas a sonda, como evidenciado no ensaio do padrão ASME (figura 4.39).

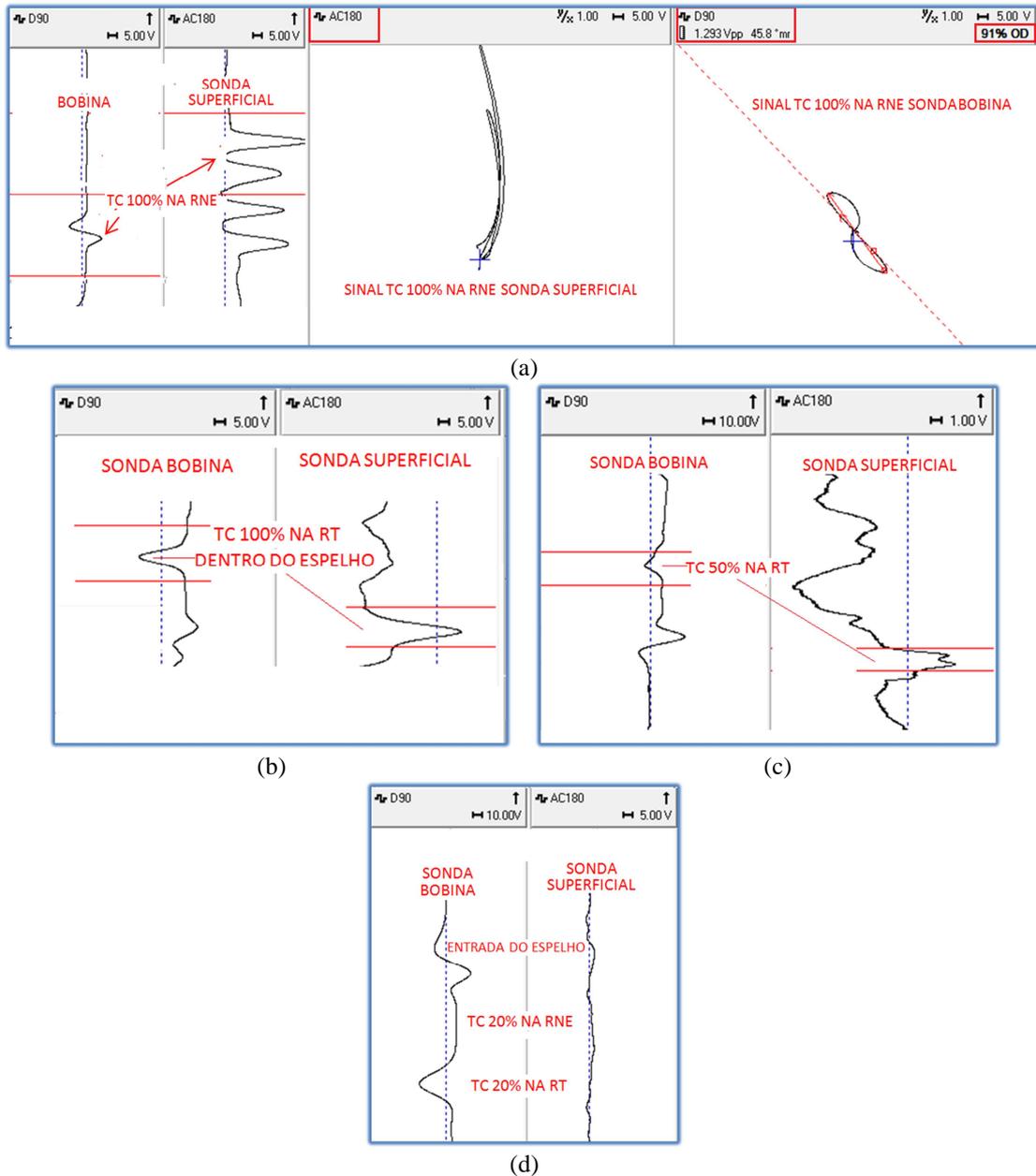


Figura 4.41 - Registros do ensaio com sonda *Pancake*

(a) Sinal da TC 100% do CP 10 na RNE fora do espelho (b) Sinal da TC 100% do CP 10 na RT dentro do espelho (c) Sinal da TC 50% do CP 11 na RT dentro do espelho (d) Sinal da TC 20% na RNE e RT do CP 12 dentro do espelho.

Fonte: O autor (2013).

Podemos observar também na figura 4.41 (d) que os sinais da entrada do espelho e da RT presentes no canal D90 não são revelados no canal AC 180, mostrando que as sondas superficiais não sentem o efeito destes componentes. Isto é devido ao campo magnético ficar bem restrito a proximidade da sonda superficial e limitados a pequenas regiões, de forma que o seu sinal não é afetado pela presença do espelho e da RT. O sinal da TC 50% na RT dentro do espelho obtido com a sonda bobina necessita de tratamento de mixagem para suprimir o sinal da RT, operação não necessária com o sinal da sonda superficial. Isto facilita a interpretação do sinal e agiliza a inspeção.

Como já mencionado anteriormente esta maior sensibilidade da sonda superficial à detecção de trincas circunferenciais é devido ao arranjo das suas bobinas, que geram os fluxos correntes parasitas favoráveis a sua detecção, isto é, fluxos perpendiculares às TC. Outro fator que favorece a detecção sob o espelho é o fato das sondas superficiais provocarem maior concentração das correntes na superfície interna (efeito pelicular) próxima a sonda, comparadas a sondas bobinas convencionais. Isto resulta numa menor influência do espelho na redução da amplitude do sinal, isto é, o canal AC da sonda superficial praticamente não sofre influência do espelho. Em compensação, para defeitos localizados na superfície externa, mais afastados da sonda, ela apresenta menor sensibilidade.

Em suma, a sonda mista tipo *Pancake* procura aliar as vantagens das sondas bobinas nos modos absoluto e diferencial e as da sonda superficial. Os ensaios de correntes parasitas com sonda mista tipo *Pancake*, com arranjo de sondas bobinas e superficiais mostraram que:

- a) A sonda superficial se mostra sensível a descontinuidades internas;
- b) A sonda superficial possui maior detectabilidade das trincas circunferenciais, comparada à sonda convencional. Porém esta vantagem se limita às trincas mais profundas, não se observando este ganho nas trincas superficiais externas, tanto circunferenciais como longitudinais;
- c) Descontinuidades dentro do espelho e na RT são caracterizadas pela sonda superficial com maior confiabilidade, comparativamente a sondas bobinas. A amplitude do sinal da sonda superficial é menos afetada pelo efeito do espelho e o sinal da RT não sobrepõe ao sinal do defeito, reduzindo a necessidade de mixagem;

d) Os ensaios de correntes parasitas com sonda *Pancake* aumenta a detecção da TC devido a ao sentido do fluxo de correntes parasitas resultante da sonda superficial ser longitudinal na superfície do tubo, permitindo obter maiores amplitudes de sinais da TC.

4.6 SONDAS ARRAY

As sondas *Array* foram utilizadas com o objetivo principal de aumentar a detectabilidade das TC e por esta razão os ensaios se concentraram nos CP 10 (TC 100% figura 3.10), CP11 (TC 50% figura 3.11) e CP12 (TC 20% figura 3.12). Os resultados da utilização da sonda *Pancake* apresentados no item 4.5 mostraram que este modelo de sonda melhorou a detectabilidade para descontinuidades circunferenciais, principalmente as mais profundas, acima de 50%, comparativamente a sondas bobinas. Porém não se observou ganho de detectabilidade em relação à bobina nas trincas superficiais externas, tanto circunferenciais como longitudinais.

Os resultados com as sondas bobinas e *Pancake* revelam dificuldades na detecção de trincas com pequenas profundidades, principalmente as TC dentro do espelho. A detecção destas descontinuidades no ensaio de correntes parasitas seria de extrema importância para uma melhor estratégia na avaliação da integridade do equipamento durante a campanha operacional.

Por esta razão acrescentamos neste trabalho a utilização do modelo de sonda *Array*, recentemente disponibilizadas comercialmente para ensaios em tubos de trocadores. Embora já utilizadas em aplicações específicas, não se tem conhecimento da sua utilização em escala industrial aqui no Brasil. A aquisição desta sonda e os ensaios preliminares em escala de laboratório visam avaliar suas vantagens e limitações antes da sua utilização no campo. Isto também permitirá definir o escopo do treinamento do pessoal para melhor utilizar os recursos desta ferramenta.

A sonda *Array* utilizada possui um arranjo que prioriza a detectabilidade das TC em qualquer região do tubo, inclusive dentro do espelho e chicanas, em tubos de aço inoxidável. Os sinais podem ser representados em 2-D ou em 3-D C-Scan para facilitar a análise dos sinais. Devido ao caráter experimental da utilização desta sonda foram selecionados alguns CP, com e sem descontinuidades, para avaliar pelas imagens a forma e localização das descontinuidades e a detectabilidade das trincas, principalmente

da TC. O objetivo principal era aumentar a detectabilidade das trincas com pequenas profundidades, principalmente as TC, que apresentaram baixa detectabilidade com as sondas bobinas e *Pancake*. Os resultados destes ensaios são apresentados a seguir.

A figura 4.42 mostra uma visualização em 3D dos registros dos sinais de correntes parasitas com a sonda *Array* no CP 2, tubo isento de descontinuidade, representando o tubo fora do espelho. Podemos observar que não houve nenhuma indicação de descontinuidade, que neste caso seria uma falsa indicação, pois não há descontinuidades neste CP. Esta visualização pode ser de grande utilidade na inspeção de feixes novos, pois pode servir de base comparativa nas inspeções posteriores em serviço, facilitando a identificação e interpretação de sinais de descontinuidades que possam surgir durante a operação do equipamento.

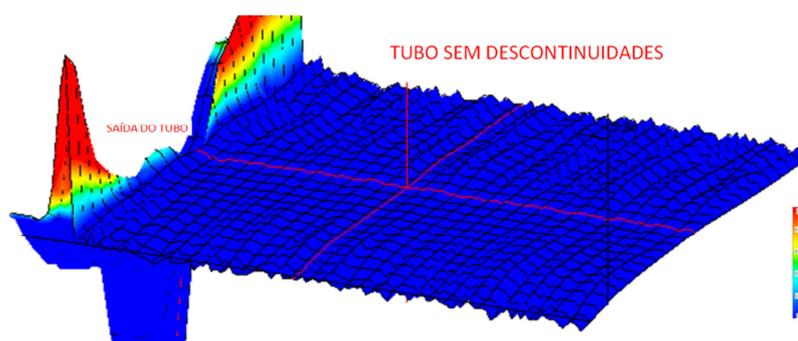


Figura 4.42 - Visualização em 3D do ensaio de correntes parasitas no CP 2 com a sonda *Array*

Fonte: O autor (2013).

Na figura 4.43 podemos visualizar o resultado do ensaio de correntes parasitas no CP 1 (figura 3.1 - padrão de calibração ASME). Observa-se que todas as descontinuidades foram detectadas com diferentes intensidades, bem como o registro da sua posição circunferencial no tubo.

Na sonda *Array* não é realizada a calibração convencional das descontinuidades do padrão e não há correção de amplitude e ângulos de fase dos sinais, procedimento convencional adotado na sonda bobina. Por esta razão não há como correlacionar diretamente os sinais da sonda *Array* com as amplitudes destes mesmos sinais obtidos no ensaio com a sonda bobina.

Podemos observar na coluna D90 da tabela 3.1 que o valor da amplitude do sinal do furo de 40% foi de 1,411 V, menor que a do furo de 80%, que foi de 2,276 V. Esta diferença de amplitude, que se traduz em diferentes detectabilidade nas sondas bobinas, não é correlacionada com as imagens em 3D da figura 4.43, onde o sinal do furo de 40% apresentou uma maior amplitude do que o furo de 80% do padrão ASME. Nas sondas bobinas a voltagem é muito influenciada pela profundidade da descontinuidade, enquanto que na sonda *Array* a diferença de diâmetro é mais relevante. Neste caso, o diâmetro da descontinuidade do furo de 40% do padrão ASME é maior que o do furo de 80%.

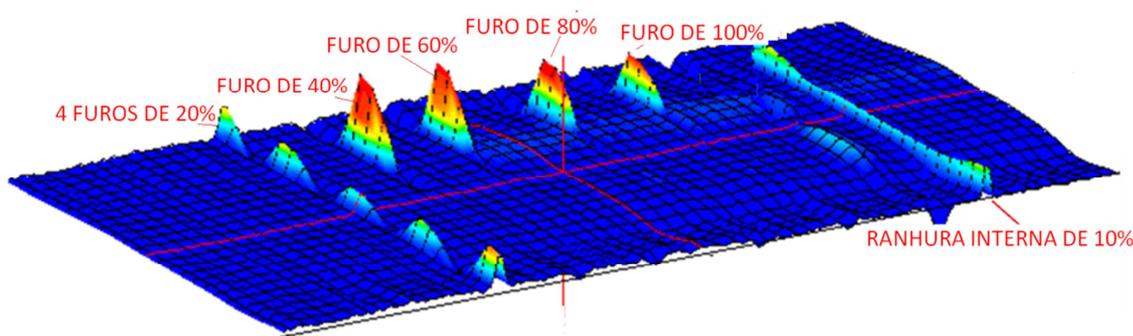


Figura 4.43 - Visualização em 3D do ensaio de correntes parasitas no CP 1 com a sonda *Array*

Fonte: O autor (2013).

Como já mencionado, a sonda *Array* utilizada é configurada para detecção de trincas circunferenciais. Ela possui um arranjo que resultam fluxos de correntes longitudinais na superfície dos tubos, diferente da sonda bobina onde estes fluxos são circunferenciais. A figura 4.44 mostra uma visualização em 3D dos registros dos sinais de correntes parasitas com a sonda *Array* no CP6 (figura 3.6 - padrão TL) e CP7 (figura 4.7 - padrão TC). Observa-se na figura 5.44 (a) que apenas os sinais da TL 100% e 80% foram detectados com confiabilidade. Nota-se uma queda acentuada da detectabilidade já na trinca TL com 80% de profundidade, com pequena indicação na TL60%, chegando a nenhuma indicação na TL20%.

Por outro lado, a figura 4.44 (b) revela a grande sensibilidade desta sonda na detecção de trincas circunferenciais. Podemos observar que TC com 40% de

profundidade foram detectáveis, tendo inclusive conseguido identificar o sinal de baixa amplitude da trinca TC 20%.

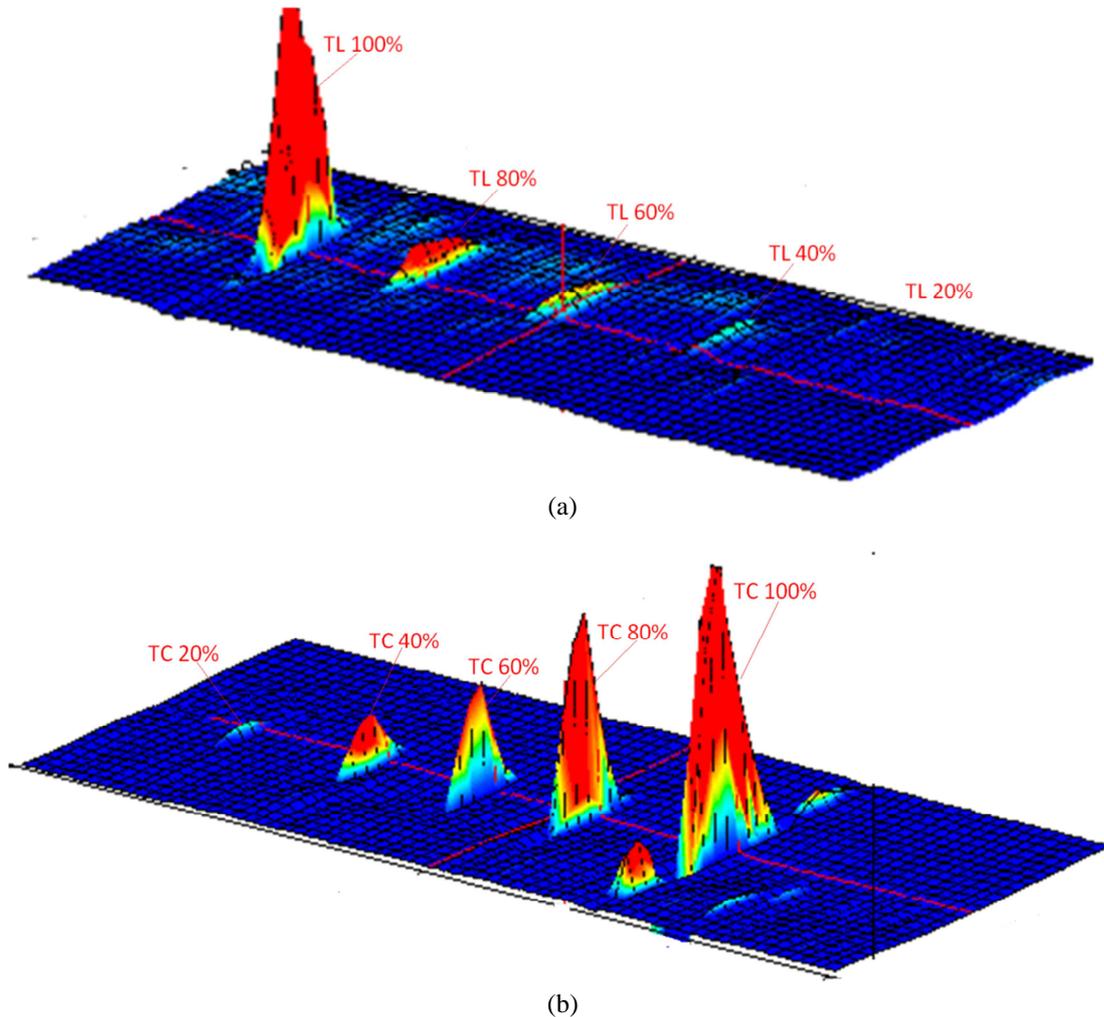


Figura 4.44 - Sinais das discontinuidades no ensaio de correntes parasitas com a sonda *Array*

(a) CP 5 e (b) CP 6

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.45 mostra uma visualização em 3D dos registros dos sinais de correntes parasitas com a sonda *Array* no CP10 (figura 4.10 - TC 100%), fora e dentro do espelho. Nesta figura é possível visualizar e identificar os sinais das TC 100% em todas as regiões (RNE, RT e RE) e em ambas as condições de ensaio. A grande sensibilidade da sonda *Array* permitiu inclusive identificar e caracterizar os sinais da mandrilagem, inclusive da RT, muito útil como referência de localização do defeito. A

detectabilidade das trincas TC 100% com a sonda *Array* é comparável com a da sonda bobina.

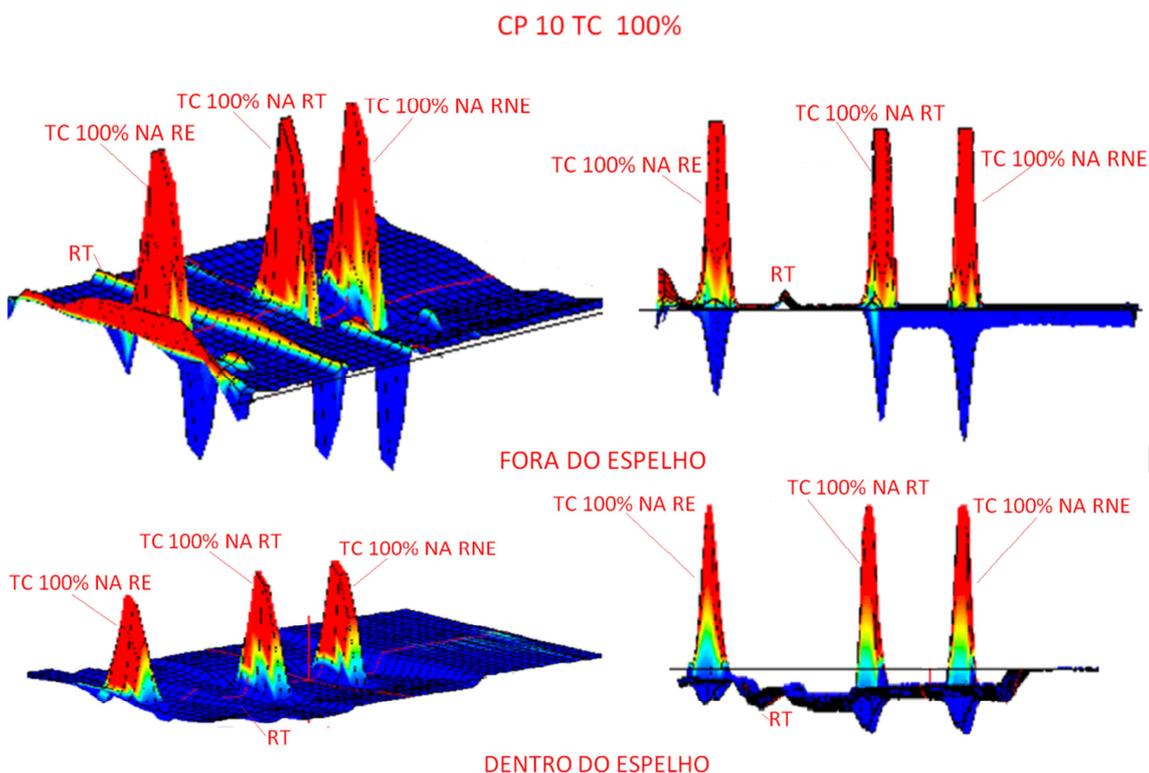


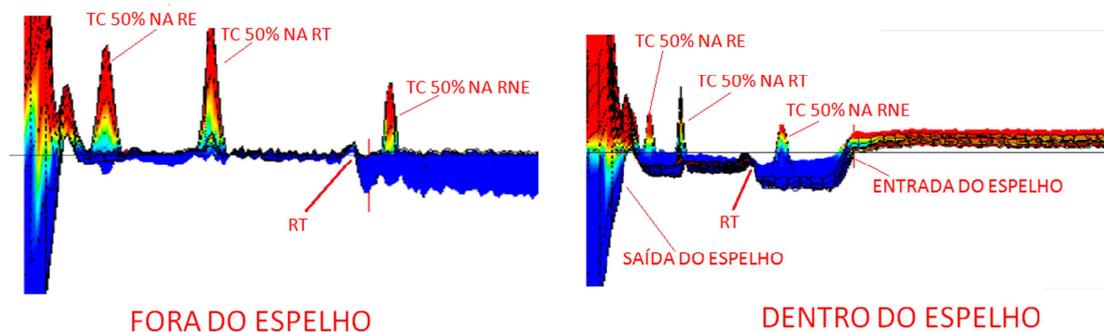
Figura 4.45 - Sinais das discontinuidades no ensaio de correntes parasitas no CP 10 com a sonda *Array* fora e dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.46 mostra uma visualização do resultado do ensaio de correntes parasitas utilizando sondas *Array* no CP 11 (figura 3.11 - TC 50%), nas condições fora e dentro do espelho. Observa-se a identificação dos sinais da trinca TC 50% em todas as regiões (RNE, RT e RE), com uma menor intensidade do sinal dentro do espelho.

A detectabilidade das TC 50% com a sonda *Array* é muito maior comparável com a da sonda bobina e *Pancake*. Nesta profundidade, com a sonda bobina convencional, o sinal da TC 50% era de difícil detecção e necessitava de um tratamento de mixagem sob a RT. A sonda *Pancake* promoveu um aumento na detectabilidade, porém limitada a esta faixa de profundidade.

CP 11 TC 50%



CP 11 TC 50%

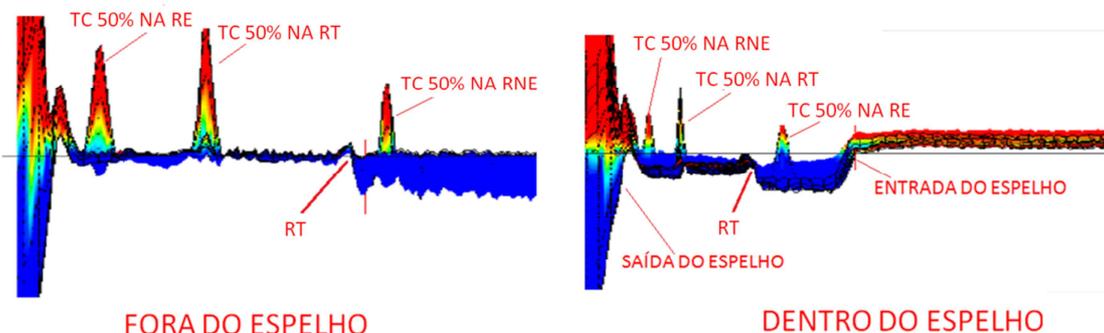


Figura 4.46 - Sinais das discontinuidades no ensaio de correntes parasitas no CP 11 com a sonda *Array* fora e dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

A figura 4.47 mostra uma visualização do resultado do ensaio de correntes parasitas utilizando sondas *Array* no CP 12 (figura 3.12 - TC 20%), nas condições fora e dentro do espelho. Observa-se que a detectabilidade já é bem reduzida, comparadas às trincas mais profundas analisadas anteriormente. Contudo é possível identificar os sinais da TC 20% fora do espelho, em todas as regiões (RNE, RT e RE). Dentro do espelho o sinal da TC 20% é revelado com menor sensibilidade na RE e RT. Na RNE o sinal não se mostra muito visível, provavelmente pela falta de uma melhor visualização devido a pouca experiência com a sonda.

Portanto a detectabilidade da TC 20% com a sonda *Array* é maior comparável com a da sonda bobina e *Pancake*, dentro e fora do espelho. Nesta profundidade, tanto a sonda bobina como a *Pancake* não detectava o sinal da TC 20%. Como as discontinuidades em serviço se localizam preferencialmente dentro do espelho (frestas,

depósitos, etc.) é importante dar continuidade ao desenvolvimento ao estudo visando aumentar a detectabilidade das trincas mais superficiais, sejam elas TC ou TL.

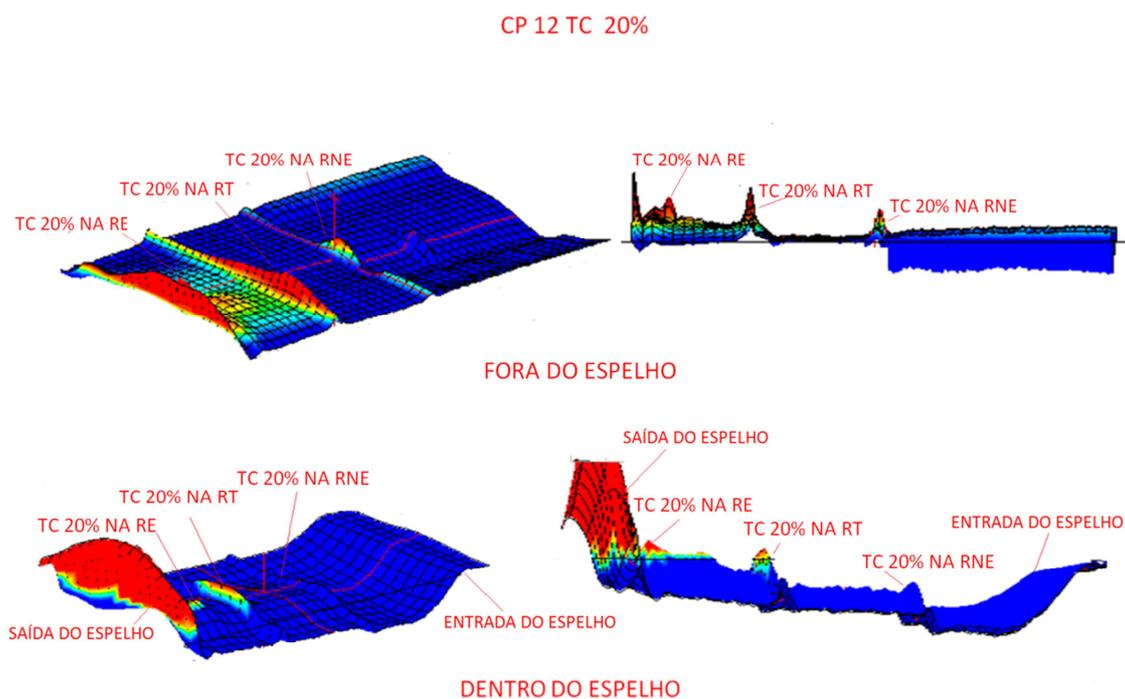


Figura 4.47 - Sinais das discontinuidades no ensaio de correntes parasitas no CP 12 com a sonda *Array* fora e dentro do espelho

Fonte: O autor (2013).

Os ensaios de correntes parasitas com sonda tipo *Array* mostraram que:

- A identificação das discontinuidades circunferenciais fora e dentro do espelho é boa, visto que as imagens adquiridas em 3D mostram a mínima influência do espelho com relação às discontinuidades na RT.
- A sonda *Array* utilizada se mostra muito sensível a discontinuidades circunferenciais. A grande sensibilidade da sonda permitiu inclusive identificar os sinais da RT da mandrilagem, muito útil como referência da localização do defeito.
- A sonda *Array* possui excelente detectabilidade das trincas circunferenciais, comparada à sonda convencional e *Pancake*. Sua utilização permitiu reduzir o limiar de detectabilidade das trincas circunferenciais. Isto vem suprir uma grande deficiência das sondas tradicionais com bobinas.

- O arranjo da sonda *Array* utilizada não conferiu aumento de detectabilidade para as trincas longitudinais.

A sonda *Array* utilizada aumentou a detectabilidade das TC e os recursos de visualização 3D ajudam a caracterizar com mais confiabilidade o tipo de dano. Porém ela não pode ser aplicada sozinha na inspeção em serviço. Devido a dificuldade de dimensionamento e sua menor detectabilidade da TL é necessário também a varredura com a sonda bobina convencional. Isto resulta em maior tempo de inspeção. Os resultados indicam que o uso conjugado destas sondas, aproveitando as vantagens de cada modelo e arranjo, irão permitir uma maior confiabilidade e eficácia da inspeção.

Uma estratégia que se mostra possível de ser implementada atualmente seria a utilização da sonda *Pancake* já na primeira varredura dos tubos do feixe. Após esta avaliação a inspeção seria complementada com a sonda *Array* nos tubos com dificuldade de interpretação dos sinais (devido a baixas amplitudes) ou para caracterização do dano. O ideal seria o desenvolvimento que conjugasse numa única sonda a bobina e o *Array*, similar a *Pancake*, e que permitisse com uma única varredura obter os sinais absolutos e diferenciais da bobina e as imagens em 3D da sonda *Array*.

Os resultados deste trabalho são semelhantes aos obtidos no estudo das United States Nuclear Regulatory Commission (KUPPERMAN *et al.*, 2002), apresentados no item 2.3.5.7 que evidenciou a grande influência do inspetor e de padrões mais próximo possível da realidade na confiabilidade do ensaio e que uma boa PoD só pôde ser conseguida para defeitos mais profundos. Os vários modelos de sonda revelaram diferentes níveis de detectabilidade das trincas dos corpos de prova, longitudinais e circunferenciais, em cada região do espelho e para cada modelo de sonda. A figura 4.48 ilustra as regiões do espelho e permite visualizar a localização das trincas.

T - tubo sem influência do espelho e da mandrilagem

EE - região da entrada do espelho

SE - região da saída do espelho

RF - região da fresta entre o tubo e espelho

RNE - região não expandida por mandrilamento

RT - região de transição do tubo com e sem mandrilamento dentro do espelho

RE - região expandida por mandrilamento dentro do espelho

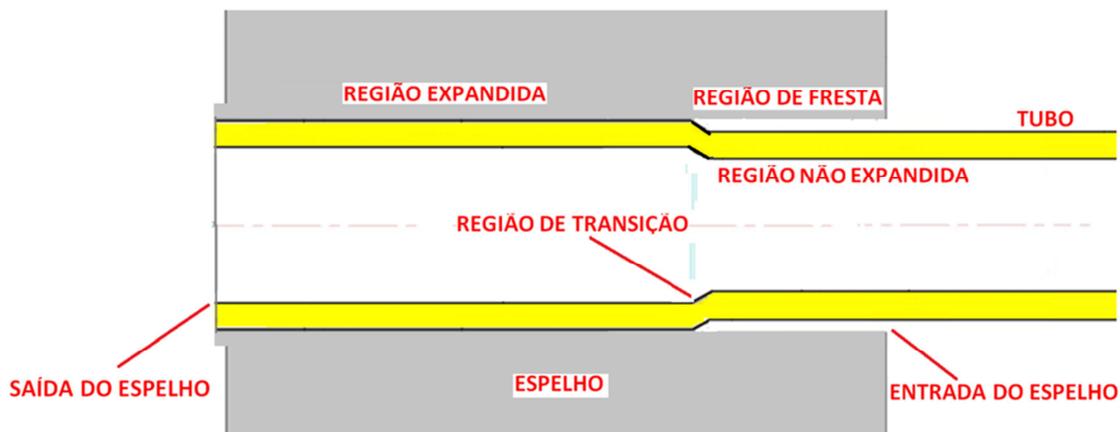


Figura 4.48 - Regiões do feixe tubular próxima ao espelho

Fonte: O autor (2013).

As figuras de 4.49 a 4.53 mostram, de uma forma qualitativa, a detectabilidade obtida nos ensaios realizados com as sondas utilizadas.

	TUBO	ESPELHO			
		EE	RF	RT	RE
TL 100% CP 7	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
TL 50% CP 8	MÉDIA	MÉDIA EXIGE MIXAGEM	MÉDIA EXIGE MIXAGEM	MÉDIA EXIGE MIXAGEM	MÉDIA EXIGE MIXAGEM
TL 20% CP 9	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA

Figura 4.49 - Detectabilidade TL Sonda Bobina

Fonte: O autor (2013).

	TUBO	ESPELHO			
		EE	RF	RT	RE
TC 100% CP 10	BOA	MÉDIA EXIGE MIXAGEM	BOA	MÉDIA EXIGE MIXAGEM	BOA
TC 50% CP 11	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA
TC 20% CP 12	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA

Figura 4.50 - Detectabilidade TC Sonda Bobina

Fonte: O autor (2013).

	TUBO	ESPELHO			
		EE	RF	RT	RE
TL 100% CP 7	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
TL 50% CP 8	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA
TL 20% CP 9	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA

Figura 4.51 - Detectabilidade TL Sonda *Pancake*

Fonte: O autor (2013).

	TUBO	ESPELHO			
		EE	RF	RT	RE
TC 100% CP 10	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA
TC 50% CP 11	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA
TC 20% CP 12	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA	NÃO DETECTA

Figura 4.52 - Detectabilidade TC Sonda *Pancake*

Fonte: O autor (2013).

	TUBO	ESPELHO			
		EE	RF	RT	RE
TC 100% CP 10	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
TC 50% CP 11	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA
TC 20% CP 12	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA

Figura 4.53 - Detectabilidade TC Sonda *Array*

Fonte: O autor (2013).

5- CONCLUSÕES

As descontinuidades tipicamente observadas em tubos de trocadores de calor em uso, tais como defeitos de fabricação, pites, trincas circunferenciais e longitudinais, são detectáveis pelo exame por correntes parasitas. É necessário utilizar a técnica de multifrequências em canais absolutos e diferenciais simultâneos para que seja possível discriminar os sinais das descontinuidades de sinais indesejados tais como aqueles produzidos por amassamentos, região de transição entre a região mandrilada e não mandrilada dos tubos, chicanas, espelhos, chapas anti-vibração, depósitos condutores e depósitos magnéticos.

O objetivo deste estudo foi analisar os sinais de correntes parasitas e estimar os limites de detecção de descontinuidades na região do espelho de trocadores de calor casco e tubo. Um dispositivo simulando o espelho, padrões e corpos de prova com trincas longitudinais e circunferenciais foram confeccionados em aço inoxidável AISI 321, em diversas profundidades e localizadas na região expandida, na região não expandida e na região de transição, representativas dentro do espelho. Utilizou-se aparelhagem e softwares com sistemas de multifrequência e multiparâmetros, sonda convencional tipo bobina e, para melhorar a detectabilidade, sondas especiais do tipo *Pancake* e *Array*. Os resultados permitem concluir que:

- As presenças do espelho, da mandrilagem e das ranhuras resultam em sinais espúrios e indesejáveis, que dificultam a interpretação dos sinais oriundos de defeitos nesta região.
- A presença do espelho altera as principais características dos sinais das descontinuidades do padrão ASME definidos na calibração convencional, como amplitude e principalmente o ângulo de fase. Isto resulta numa menor confiabilidade da indicação da profundidade.

- A utilização de sistemas com multifrequências e multicanais permite separar e caracterizar defeitos dos sinais espúrios indesejáveis oriundos de geometrias, depósitos, etc.
- Devido a sua orientação, em relação ao fluxo de correntes induzidas pela sonda bobina, as trincas longitudinais são melhor detectadas e discriminadas do que as equivalentes circunferenciais, basicamente porque produzem sinais de maior amplitude.
- Descontinuidades que geram sinais de grandes amplitudes como as trincas profundas, não são difíceis de serem detectadas com a sonda bobina. Porém, trincas superficiais, principalmente as trincas circunferenciais e sob a região de transição necessitam de mixagem para se discriminar e caracterizar o sinal com confiabilidade, sendo por esta razão de mais difícil detecção.
- A sonda *Pancake* não sofre a influência do espelho e da região de transição, não necessitando da operação de mixagem para supressão destes sinais. Isto facilita a análise e agiliza a inspeção.
- A sonda *Pancake* aumentou a detectabilidade em relação à sonda bobina das trincas circunferenciais na faixa de 50% de profundidade, não se observando este ganho nas trincas superficiais externas, tanto circunferenciais como longitudinais. Nas trincas circunferenciais com 20% sua detectabilidade foi baixa, similar à bobina.
- A sonda *Array* apresentou excelente detectabilidade às trincas circunferenciais, quando comparada às sondas convencional e *Pancake*. Sua utilização permitiu reduzir o limiar de detectabilidade das trincas circunferenciais, sendo possível revelar o sinal da trinca com 20% de profundidade dentro do espelho. Isto vem suprir uma grande deficiência das sondas tradicionais com bobinas.
- A grande sensibilidade da sonda *Array* permite caracterizar e determinar a extensão das descontinuidades e revelar sua localização em relação às características

geométricas. Estas informações ajudam no diagnóstico do mecanismo de dano e de suas causas.

- A interpretação e análise dos resultados da inspeção nas diversas regiões dentro espelho demandam a elaboração de procedimentos específicos para cada inspeção. Este procedimento deve considerar as propriedades dos materiais do tubo e do espelho, as características geométricas locais, as características físicas e localização das discontinuidades que estão sendo procuradas e os possíveis sinais espúrios que podem ser gerados em uma situação real.

- Eventualmente é necessária a confecção de dispositivos, espelhos e padrões com discontinuidades típicas para qualificar o procedimento. Este procedimento, qualificado por profissional Nível 3 (certificação conforme ABENDI), deve indicar os critérios de avaliação que serão aplicados no momento da inspeção e as situações em que a análise dos sinais deve ser executada com apoio técnico especializado.

6- TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos de pesquisa sobre a análise de sinais de correntes parasitas na região do espelho de trocadores de calor são feitas as seguintes sugestões:

- Realizar tratamento nos sinais das trincas com baixas amplitudes visando obter o sinal característico do defeito.
- Estudar a representatividade de padrões ASME para detecção e dimensionamento de discontinuidades típicas que ocorrem em tubos de trocadores de calor resultantes da sua deterioração em uso.
- Complementar este estudo comparativo da detectabilidade das sondas com trincas inclinadas.
- Desenvolver sondas com arranjo conjunto de *Array* e bobinas para possibilitar obter ambos os sinais em uma única varredura.
- Realizar experimentos com sondas Transmissoras/Receptoras e com sondas associadas a sensores *Hall*, que se mostraram com grande potencial de aplicação na inspeção de tubos de trocadores de calor.
- Utilizar a mesma metodologia utilizada neste trabalho para tubos de aço duplex e super-duplex, materiais atualmente com grande aplicação em feixes tubulares.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO.

ABNT NBR 15193 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio não destrutivo - Correntes parasitas — Tubos não ferromagnéticos Instalados em trocadores de calor**, 2009.

AECL - Atomic Energy of Canada Limited – **Eddy Current Manual**, 1984

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **Boiler and pressure vessel code**: section V. [S.l.], 2008.

ARAÚJO, M. D., SILVA, A. R., Aplicação conjugadas das técnicas IRIS, correntes parasitas, campo remoto e MFL na inspeção de tubos de troca térmica. **7º Encontro Regional de END e Inspeção**, São Leopoldo, RS, 2009.

ASM. Corrosion.. **ASM metals handbook**. [S.l.], 1987. Vol. 13.

ASM. Nondestructive evaluation and quality control. **ASM metals handbook**. [S.l.], 1989. Pp. 164-194. Vol. 17.

ASM. Properties and selection: Iron steels and high performance alloys. **ASM metals handbook**. [S.l.], 1990. Vol. 1.

ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED (AECL). **Eddy current manual**. [S.l.], 1984.

BACHILLER, **Shell and tube heat exchanger**. Barcelona, c2011. Disponível em: <www.bachiller.com>. Acesso em: 3 set. 2012.

BARBOZA, K. R. A., 2009, **Avaliação da técnica de inspeção por correntes parasitas em tubos de permutador de calor**, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

BRITISH PETROLEUM COMPANY (BPC). **Heat exchanger tube end fixing**, Middlesex, UK, Engineering Practices Group, Research & Engineering Centre, 1996.

BIRRING, A. S. Selection of NDT techniques for inspection of heat exchanger tubing, **The ASNT International Conference of Petroleum Industry Inspection**, Houston, Texas, 1999.

CECCO, V. S.; SHARP, F. L., Recent advances in probe design for eddy current testing of heat exchangers, **NDT International**, v. 22, no. 4, pp. 217-221, 1989.

EL-ROUBI, E. Y., KERMANI, B., SELIM NACIF, M., The impact of chloride contamination from leaking heat-exchanger tubes on plant materials of construction. **The Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference**, Abu Dhabi, UAE, 2006.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **Eddy current testing of service water heat exchangers for engineers guideline**. In: Report TR-110392, EPRI, Palo Alto, CA, 1999.

GARCIA, J. M., GÓMEZ, J. G., VÁSQUEZ, E. S. Non-destructive techniques based on eddy current testing, **Sensors**, v. 11, pp. 2525-2565, 2011.

GENERAL ELECTRIC COMPANY (GE). **GEIT-10001US(3/5): Inspection technologies eddy current**. [S.l.], 2005a. Disponível em: <<http://www.GEInspectionTechnologies.com>>. Acesso em: 6 set. 2012.

GENERAL ELECTRIC COMPANY (GE). **GEIT-50011US(3/5): Eddy current reference blocks & standards**. [S.l.], 2005b. Disponível em: <<http://www.ge-mcs.com>>. Acesso em: 6 set. 2012.

GESMEX, **Information about design function and operation of heat exchanger**. [S.l.], [2012?]. Disponível em: <www.gesmex.com>. Acesso em: 5 set. 2012.

HANSEN, J., **The eddy current inspection method part 1. history and electrical theory**, *Insight*, v. 4, no. 5, 2004.

HENRIQUES, P. C. F., CARNEVAL, R. O. **Ensaio não-destrutivo por correntes parasitas**, Rio de Janeiro, Petrobras, 1990.

IAEA- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **Eddy current testing at level 2: manual for the syllabi contained in IAEA-TECDOC-628.Rev. 2**. In: International Atomic Energy Agency. **Training guidelines for non-destructive testing techniques**, Vienna, 2011.

IMOA. **Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steel**, London, UK, The International Molybdenum Association, 2009.

JINYI LEE, JONGWOO JUN, JUNGMIN KIM, HOYOON CHOI and MINHUY LE, *Bobbin-Type Solid-State Hall Sensor Array with High Spatial Resolution for Cracks Inspection in Small-Bore Piping Systems*, **Intermag**, 2012

KHATAK, H. S., RAJ, B. **Corrosion of austenitic stainless steels: mechanism, mitigation and monitoring**. Pangbourne, UK, Alpha Science International Ltd., 2002.

KLM TECHNOLOGY GROUP. **Heat exchanger selection and sizing (Engineering design guideline)**. [S.l.], c2009. Disponível em: <<http://www.klmtechgroup.com>>. Acesso em: 15 ago. 2012.

KUPPERMAN, D. S., BAKHTIARI, S., SHACK, W. J. et al., **Eddy current analysis round robin using the NRC steam generator mockup**. 4th International Steam Generator Conference, May 5-8, 2002, Toronto, Canada.

LUNIN, V., ZHDANOV, A. **Automated Data Analysis in Eddy Current Inspection of Steam Generator Tubes**. ECNDT, 2006

METALLURGICAL TECHNOLOGIES INC (MTi). **Stress corrosion cracking and intergranular corrosion of a 316Ti stainless steel preheater tube**. Mooresville, NC, 28115. Disponível: <<http://www.met-tech.com>>. Acesso em: 28 set. 2012.

METALLURGICAL TECHNOLOGIES INC (MTi). **Analysis of chloride and mic pitted still condenser tubes**. Mooresville, NC, 28115. Disponível: <<http://www.met-tech.com>>. Acesso em: 12 nov. 2013.

MUKHERJEE, R., Effectively design shell-and-tube heat exchangers, **Chemical Engineering Progress**, Feb. 1998.

NDE. **Selection of NDT techniques for inspection of heat exchanger tubing**. [S.l.], [2012?]. Disponível em: <www.ndet.com>. Acesso em: 27 ago. 2012.

NON DESTRUCTIVE TESTING (NDT). **Eddy current testing**. [S.l.], 2012. Disponível em: <www.ndt-ed.org>. Acesso em: 5 ago. 2012.

OBRUTSKY, L. S., LEPINE, B., LU, J. *et al.* Eddy current technology for heat exchanger and steam generator tube inspection. In: **16th World Conference on Nondestructive Evaluation**, Montreal, Canada, 2004.

OBRUTSKY, L.; RENAUD, J.; LAKHAN, R., Overview of steam generator tube-inspection technology. **NDT National Conference**, Canada, NTD, 2009.

OLIVEIRA, A. L. L., 2009, **Estudo da técnica de ondas guiadas aplicada à inspeção de tubos de permutador de calor**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

PLAUT, R. L., HERRERA, C., ESCRIBA, D. M., *et al.*, A short review on wrought austenitic stainless steels at high temperatures: processing, microstructure, properties and performance, **Materials Research**, v. 10, pp.453-460, 2007.

POLYSOUDE. **TIG / GTAW welding of tubes to tube sheet joints**. [S.l.], [2012?]. Disponível em: <www.polysoude.com>. Acesso em: 5 set. 2012.

RITONI, M., MARTINS, M., MEI, P. R. Efeito do tratamento térmico na estrutura e nas propriedades mecânicas de um aço inoxidável superaustenítico, **Rem: Rev. Esc.**, Ouro Preto, MG, v. 60, n. 1, mar. 2007.

SADEK, H. M., **Latest development in NDE of heat exchangers and boiler tubes**. Doha, Qatar, University of Qatar, Nov. 8, 1999.

SADEK, S. M. NDE technologies for the examination of heat exchangers and boiler tubes—principles, advantages and limitations, **British Journal of Nondestructive Testing and Condition Monitoring**, v. 48, no. 3, pp. 181-183, 2006.

SCHVARTZMANI, M.M.A.M.; MATIASII, ADALBERTO; CRUZIII, J.R.B., Avaliação da corrosão sob tensão em aço inoxidável AISI 321 em ambiente de reator nuclear, *Revista Matéria (Rio J.)* vol.15 no.1 Rio de Janeiro 2010

SEDRIKS, A. J. Corrosion of stainless steels. 2nd ed. New York, John Wiley & Sons, 1996.

STEGEMANN, D. Fundamentos do método de correntes parasitas. Scientific Series of the International Bureau, Jülich, Forschungszentrum Jülich, 1990.

STEWART, M., ORAN, L. Heat exchanger equipment field manual: common operating problems and practical solutions. [S.l.], Elsevier, 2012.

TELLES, P. C. S. Vasos de pressão. 2. ed. [S.l.], LTC, 2001.

TROCALOR. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.trocalor.com.br>>. Acesso em: 16 ago. 2012.

TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURES ASSOCIATION (TEMA). 9th ed. New York, 1999.

UDPA, L., RAMUHALLI, P., BENSON, J. *et al.*, Automated analysis of eddy current signals in steam generator tube inspection. In: **16th World Conference on Nondestructive Evaluation**, Montreal, Canada, 2004.