



PoD APLICADO À SIGNIFICÂNCIA DE DESCONTINUIDADES PELA TÉCNICA
ULTRASSÔNICA

Pablo Uchôa Bartholo

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

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rebello
Luís Marcelo Marques Tavares

Rio de Janeiro
Maio de 2011

PoD APLICADO À SIGNIFICÂNCIA DE DESCONTINUIDADES PELA TÉCNICA
ULTRASSÔNICA

Pablo Uchôa Bartholo

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. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D

Prof. Edson Vasques Moreira, D.Sc.

Dr. Sergio Damasceno Soares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2011

Bartholo, Pablo Uchôa

PoD Aplicado à Significância de Descontinuidades
pela Técnica Ultrassônica/ Pablo Uchôa Bartholo. - Rio de
Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XIV, 142p.: Il.; 29,7cm

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rebello

Luís Marcelo Marques Tavares

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa
de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 123-126.

1. Ultrassom. 2. Confiabilidade. 3. PoD. I.
Rebello, João Marcos Alcoforado *et al.* II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de
Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

*Dedico aos meus pais,
minha irmã Flávia e a Renata,
por todo carinho e dedicação.*

Agradecimentos

Ao professor João Marcos Alcoforado Rebello, pela orientação durante todo o trabalho. Seu encorajamento desde meu ingresso ao laboratório e as oportunidades que me foram dadas, permitiram o sucesso deste trabalho.

Ao professor Luis Marcelo Marques Tavares, pela orientação, apoio e pela atenção despendida sempre quando necessário. Graças a ele, foi possível avançar cada vez mais em minha pesquisa.

Ao Eng. e amigo Rômulo Moreira de Almeida, pelo seu companheirismo e por toda sua disposição em ajudar quaisquer que fossem as tarefas.

Ao Eng. e amigo Marcos Paulo Vieira de Souza, pela sua dedicação e paciência ao me orientar no meu ingresso ao laboratório.

Ao Eng. e amigo Rodrigo Sacramento da Silva, por toda sua atenção e dedicação a qualquer momento.

Ao amigo Fábio Calé da Silva pela sua ajuda excepcional na realização de ensaios experimentais.

A todos os colegas do LNDC pela paciência e companheirismo no convívio diário.

Um agradecimento especial vai para o CENPES, pelo apoio irrestrito que sempre obtive daquele centro de pesquisa, principalmente do pessoal do TMEC.

Ao Engenheiro Sérgio Damasceno Soares por disponibilizar material e pessoal qualificado para a confecção dos corpos de prova.

Ao Engenheiro Humberto Campinho Soares pela sua ajuda e parceria ao longo do estudo do tema abordado nessa dissertação.

Ao Engenheiro Edson Vasques Moreira pela grande parceria no estudo de confiabilidade em tubos.

Aos colegas do PEMM, professores, funcionários e alunos, pelo companheirismo durante todos estes anos.

Aos meus familiares por todo apoio e motivação que sempre me dedicaram.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

A Deus pela oportunidade que me foi oferecida.

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

PoD APLICADO À SIGNIFICÂNCIA DE DESCONTINUIDADES PELA TÉCNICA
ULTRASSÔNICA

Pablo Uchôa Bartholo

Maio / 2011

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rebello

Luís Marcelo Marques Tavares

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Este trabalho consiste em um estudo avançado em confiabilidade aplicada ao ensaio ultrassônico convencional em soldas circunferenciais de tubos API 5L X70, contendo defeitos do tipo falta de fusão e penetração, com dimensões variadas. A análise da confiabilidade foi realizada através de curvas ROC, curvas PoD convencional e multivariada. No estudo da confiabilidade, foram utilizadas técnicas auxiliares para uma determinação mais precisa do tamanho dos defeitos. Os resultados dessa análise de confiabilidade foram correlacionados com a significância de defeitos através do procedimento ECA. Foi possível constatar que ao combinar a confiabilidade com a mecânica da fratura, pode-se determinar as dimensões de defeitos que são admissíveis pelo ECA e que possuem 90% de PoD.

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

PoD APPLIED TO SIGNIFICANCE OF DISCONTINUITIES BY ULTRASONIC
TECHNIQUE

Pablo Uchôa Bartholo

May / 2011

Advisors: João Marcos Alcoforado Rebello

Luís Marcelo Marques Tavares

Department: Metallurgical and Materials Engineering

This work presents an advanced study of reliability applied to conventional ultrasonic test circumferencial welds of pipelines, specification API 5L X70, containing defects of lack of fusion and penetration, with varying dimensions. The reliability analysis was performed using ROC curves, conventional and multivariate PoD curves. In the reliability study, auxiliary techniques for a more precise determination of the size of the defects were used. The results of reliability analysis were correlated with the significance of defects by using the ECA procedure. When the reliability is combined with the fracture mechanics, the dimensions of defects that are permissible by ECA and have 90% PoD can be determined.

SUMÁRIO

Capítulo I: Introdução.....	1
Capítulo II: Objetivo.....	3
Capítulo III: Revisão Teórica	4
III.1 – Conceitos de Confiabilidade	4
III.1.1 – Introdução a Confiabilidade.....	4
III.1.2 – Fatores que Influenciam a Confiabilidade	6
III.1.3 – Inspeção Baseada em Risco (RBI) e Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM)	12
III.1.4 – Probabilidade de Detecção e Curvas PoD	15
III.1.4.1 – Probabilidade de Detecção	15
III.1.4.2 – Curvas PoD	16
III.1.4.3 – Curvas Experimentais	18
III.1.4.4 – Curvas Modeladas	18
III.1.4.5 – Curvas por Simulação Física de Descontinuidades	20
III.1.4.6 – Requerimentos Experimentais.....	21
III.1.5 – Modelagem de Curvas PoD	23
III.1.5.1 – Tipos de Modelagem.....	23
III.1.5.2 – Métodos de Análise de Dados: <i>hit/miss</i>	23
III.1.5.3 – Métodos de Análise de Dados: <i>â versus a</i>	26
III.1.6 – Curvas PoD em Dutos.....	35
III.1.6.1 – Ultrassom Automatizado (AUT).....	35
III.1.6.2 – Ultrassom Manual (UT)	40
III.1.7 – Softwares de PoD.....	44
III.1.7.1 – STATUS vr.2	45
III.1.7.2 – mh 1823.....	47
III.1.8 – Intervalos de Confiança e Estatística	51
III.1.9 – Probabilidade de Falso Alarme (PFA).....	59
III.1.10 – Curvas ROC	60

III.2 – Procedimento ECA.....	64
III.2.1 – Mecânica da Fratura.....	64
III.2.2 – Avaliação Crítica de Engenharia (ECA).....	68
III.3 – ECA e PoD	74
Capítulo IV: Materiais e Metodologia	77
IV.1 – Materiais	77
IV.1.1 – Corpo de Prova	77
IV.1.2 – Defeitos.....	78
IV.2 – Metodologia	80
IV.2.1 – Planejamento Experimental	80
IV.2.2 – Ensaio Radiográfico.....	80
IV.2.3 – Ensaio Ultrassônico Automatizado (AUT).....	81
IV.2.4 – Ensaio ToFD	84
IV.2.5 – Ensaio Ultrassônico Manual	86
IV.2.5.1 – Inspeção Convencional	86
IV.2.5.2 – Inspeção Pontual	87
IV.2.6 – Desenvolvimento das Curvas	88
IV.2.6.1 – Curvas PoD	88
IV.2.6.2 – Curvas ROC	91
IV.2.7 – Análise de Dimensionamento	92
Capítulo V: Resultados e Discussões	94
V.1 – Ultrassom Manual	94
V.2 – Ultrassom Automatizado.....	95
V.3 – ToFD	96
V.4 – Radiografia.....	97
V.5 – Elaboração do Gabarito.....	99
V.6 – Erro de Dimensionamento.....	101
V.7 – Curvas PoD	103
IV.7.1 – Influência da Análise de Dados	103
IV.7.2 – Influência de Diferentes Inspetores	104
IV.7.3 – Influência de Diferentes Técnicas	105

IV.7.4 – Influência de Diferentes tipos de Defeitos.....	107
V.8 – Curvas ROC	107
V.9 – Curvas PoD multivariadas: PoD 3D	110
V.10 – PoD e ECA	111
Capítulo VI: Considerações Finais.....	118
Capítulo VII: Conclusões.....	119
Capítulo VIII: Trabalhos Futuros.....	121
Referências Bibliográficas	123
Anexos.....	127

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura III.1 – Representação ilustrativa da confiabilidade de uma descontinuidade para uma técnica de END adotada</i>	<i>5</i>
<i>Figura III.2 – Simulação de uma inspeção ultrassônica:</i>	
<i>(a) percurso sônico, (b) sinal A-Scan</i>	<i>8</i>
<i>Figura III.3 – Ilustração da inspeção de um defeito do tipo falta de fusão:</i>	
<i>(a) radiografia e (b) ultrassom</i>	<i>9</i>
<i>Figura III.4 – Inspeção radiográfica de porosidades:</i>	
<i>(a) esquema de um corte transversal do cordão e (b) filme radiográfico</i>	<i>10</i>
<i>Figura III.5 – Simulação de uma inspeção ultrassônica de uma porosidade:</i>	
<i>(a) percurso sônico e (b) sinal A-Scan.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura III.6 – Efeito humano na probabilidade de detecção por ultrassom</i>	<i>11</i>
<i>Figura III.7 – Curva de projeto</i>	<i>13</i>
<i>Figura III.8 – Mapa de risco.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura III.9 – Comparação entre uma curva PoD ideal e real</i>	<i>17</i>
<i>Figura III.10 – Modelo físico da rede de inspeção</i>	<i>21</i>
<i>Figura III.11 – Patamares de detecção e não detecção</i>	<i>25</i>
<i>Figura III.12 – Curva PoD (análise hit/miss).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura III.13 – Distribuição dos sinais do ultrassom</i>	<i>28</i>
<i>Figura III.14 – Sinais de saturação do sistema ultrassônico</i>	<i>28</i>
<i>Figura III.15 – Limiares superior e inferiores:</i>	
<i>(a) três limiares e (b) dois limiares.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura III.16 – Função de densidade de probabilidade</i>	<i>31</i>
<i>Figura III.17 - Determinação da PoD de sinais próximos aos limiares</i>	<i>32</i>
<i>Figura III.18 – Curva PoD (análise \hat{a} versus a)</i>	<i>33</i>
<i>Figura III.19 – Relação linear de alturas reais e medidas</i>	<i>34</i>
<i>Figura III.20 – Esquema da análise \hat{a} versus a</i>	<i>35</i>
<i>Figura III.21 – Sistema AUT.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura III.22 – Discriminação de zonas:</i>	
<i>(a) zonas e (b) cabeçotes</i>	<i>37</i>
<i>Figura III.23 – Varredura planificada do ensaio AUT</i>	<i>38</i>
<i>Figura III.24 – Curva PoD para o sistema AUT.....</i>	<i>39</i>

<i>Figura III.25 – Variação da altura com 90% de PoD em função do comprimento</i>	39
<i>Figura III.26 – PoD para diferentes classes de defeitos:</i>	
<i>(a) falta de penetração e (b) falta de fusão</i>	41
<i>Figura III.27 – PoD comparativa entre tipos de defeitos</i>	42
<i>Figura III.28 – Mapa dos defeitos inseridos artificialmente</i>	42
<i>Figura III.29 – PoD comparando diferentes inspetores:</i>	
<i>(a) hit/miss e (b) \hat{a} versus a</i>	44
<i>Figura III.30 – Interface do STATUS vr.2</i>	45
<i>Figura III.31 – Curva PoD do software STATUS vr.2 para análise hit/miss</i>	46
<i>Figura III.32 – Curva PoD do software STATUS vr.2 para análise \hat{a} versus a</i>	47
<i>Figura III.33 – Relação linear das dimensões reais e medidas: STATUS vr.2</i>	47
<i>Figura III.34 – Interface do mh 1823</i>	48
<i>Figura III.35 – Curva PoD do software mh 1823</i>	50
<i>Figura III.36 - Relação linear das dimensões reais e medidas: mh 1823</i>	50
<i>Figura III.37 – Curva PoD com intervalo de confiança de 95%</i>	52
<i>Figura III.38 – Função de densidade de probabilidade:</i>	
<i>(a) na curva PoD e (b) 5% de significância</i>	52
<i>Figura III.39 – Intervalos de confiança unilaterais inferiores para proporções de detecção</i>	55
<i>Figura III.40 – Técnica bootstrap</i>	57
<i>Figura III.41 – Distribuição da frequência dos erros de dimensionamento</i>	58
<i>Figura III.42 – Limite aceitável de subdimensionamento</i>	59
<i>Figura III.43 – Filtragem de ruídos</i>	60
<i>Figura III.44 – Esquema dos quatro possíveis sinais de retorno</i>	61
<i>Figura III.45 – Curva ROC</i>	62
<i>Figura III.46 – Tipos de sinais de retorno ao longo do cordão de solda</i>	63
<i>Figura III.47 – Sensibilidade da curva ROC</i>	64
<i>Figura III.48 – Comparação esquemática do comportamento tensão-deformação de materiais elástico não-lineares e elasto-plástico</i>	67
<i>Figura III.49 – Contorno de integração fechado anti-horário para determinação da Integral J</i>	68
<i>Figura III.50 – Processo ECA</i>	72

<i>Figura III.51 – Macrografia de trincas de fadiga.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura III.52 – Correlação entre as alturas medidas e reais.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura IV.1 – Corpo de prova confeccionado</i>	<i>78</i>
<i>Figura IV.2 – Representação esquemática do tipo de defeito falta de penetração</i>	<i>78</i>
<i>Figura IV.3 – Representação esquemática do tipo de defeito falta de fusão</i>	<i>79</i>
<i>Figura IV.4 - Metodologia empregada para simular defeitos de falta de fusão</i>	<i>79</i>
<i>Figura IV.5 - Esquema do sistema para inspeção ultrassônica automatizada</i>	<i>82</i>
<i>Figura IV.6 - Sistema para inspeção ultrassônica automatizada de soldas.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura IV.7 - Veículo de inspeção</i>	<i>83</i>
<i>Figura IV.8 - Janela do programa para configuração dos parâmetros de inspeção...84</i>	
<i>Figura IV.9 - Janela do programa para aquisição dos sinais</i>	<i>84</i>
<i>Figura IV.10 - Janela do programa para análise dos resultados da técnica ToFD85</i>	
<i>Figura IV.11 - Varredura pela técnica ultra-sônica ToFD</i>	<i>86</i>
<i>Figura IV.12 – Aparelhos ultrassônicos utilizados</i>	<i>87</i>
<i>Figura IV.13 – Relatório de inspeção para curva ROC.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura IV.14 – Distribuição de proporção de detecção multivariada</i>	<i>91</i>
<i>Figura V.1 - Imagem D-scan referente à solda 2.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura V.2 – Mapa dos defeitos</i>	<i>101</i>
<i>Figura V.3 – Erro do dimensionamento do ensaio ultrassônico manual</i>	<i>102</i>
<i>Figura V.4 – Comparação das análises de dados.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura V.5 – Comparação dos diferentes inspetores</i>	<i>105</i>
<i>Figura V.6 – Comparação das técnicas de ensaio não destrutivo</i>	<i>106</i>
<i>Figura V.7 – Comparação dos tipos de defeito.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura V.8 – Curvas ROC.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura V.9 – Influência da altura nas curvas ROC.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura V.10 – Influência do tipo de defeito nas curvas ROC.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura V.11 – PoD 3D para o ensaio ultrassônico manual.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura V.12 – Análise ECA para defeitos internos e externos</i>	<i>113</i>
<i>Figura V.13 – Vista de topo da superfície PoD.</i>	<i>114</i>
<i>Figura V.14 – Correlação PoD x ECA</i>	<i>115</i>
<i>Figura V.15 – Detalhe da região de defeitos admissíveis com 90% de PoD</i>	<i>116</i>
<i>Figura V.16 – Análise de possíveis casos PoD vs ECA.....</i>	<i>117</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela III.1 – Atenuação sônica para diferentes processamentos de um aço inoxidável Cr-Ni.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabela III.2 – Definições de área afetada e probabilidade de risco</i>	<i>13</i>
<i>Tabela III.3 – Dados da análise hit/miss</i>	<i>24</i>
<i>Tabela III.4 - Relação das soldas com os tipos de defeitos</i>	<i>43</i>
<i>Tabela III.5 – Dados para o software mh1823: análise hit/miss.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela III.6 – Dados para o software mh1823: análise \hat{a} versus a</i>	<i>49</i>
<i>Tabela III.7 – Intervalo de confiança pela distribuição de Bernoulli.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela III.8 – Critério de aceitação de defeitos de soldagem (DNV-OS-F101).....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela III.9 – Critério de aceitação das propriedades mecânicas (DNV-OS-F101) ...</i>	<i>70</i>
<i>Tabela III.10 – Testes para o uso do ECA estático – baixo</i>	<i>72</i>
<i>Tabela III.11 – Valor de integral J para tamanhos admissíveis (diâmetro entre 8” e 12”).....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela III.12 – Corpos de prova com as alturas das trincas de fadiga</i>	<i>75</i>
<i>Tabela III.13 – Exemplo de decisão com base no critério de segurança</i>	<i>76</i>
<i>Tabela V.1 – Resultados da inspeção ultrassônica manual do inspetor 1</i>	<i>95</i>
<i>Tabela V.2 - Dimensionamento dos defeitos obtidos por ensaio ultrassônico automatizado</i>	<i>96</i>
<i>Tabela V.3 - Dimensionamento dos defeitos da solda 2 obtidos por ToFD</i>	<i>96</i>
<i>Tabela V.4 – Resultado do ensaio radiográfico.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabela V.5 – Dados do ensaio radiográfico nas juntas soldadas 3 e 4.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabela V.6 – Gabarito baseado em AUT</i>	<i>100</i>
<i>Tabela V.7 – Valores de comprimento e altura admissíveis</i>	<i>112</i>
<i>Tabela V.8 – Dados do tubo da análise ECA.....</i>	<i>112</i>

Capítulo I

Introdução

Os ensaios não destrutivos (END) são ferramentas essenciais na avaliação da integridade de equipamentos diversos, em quase todos os ramos industriais. Aplicando técnicas de END é possível comprovar a presença de descontinuidades existentes tanto na superfície como no interior de uma peça. Essas descontinuidades podem comprometer a vida útil de um equipamento, podendo levá-lo a uma falha.

Com o avanço da tecnologia, essas técnicas vêm se tornando cada vez mais sofisticadas e precisas através do uso de sistemas automatizados, visando diminuir o máximo possível os erros de detecção durante uma inspeção.

Porém, rotineiramente são utilizadas técnicas manuais como procedimentos de inspeção de equipamentos, necessitando ainda mais da operação e habilidade humana. É sabido que o fator que prevalece na geração de erros durante uma inspeção é a falha humana e com isso, técnicas manuais apresentam uma menor confiabilidade.

Desta maneira, através de uma análise estatística é possível quantificar a confiabilidade de detecção de uma descontinuidade para uma técnica de END empregada. A ferramenta para essa análise são as curvas PoD (“*probability of detection*”), que podem ser obtidas através de inúmeros resultados experimentais ou através de modelagem matemática.

As curvas PoD são curvas matemáticas, descritas de maneira similar a uma função cumulativa de probabilidades, nas quais o valor mínimo encontrado é referente a 0% e o valor máximo é referente a 100%. Essas curvas são normalmente descritas em função de uma dimensão da descontinuidade (a) a qual pode ser o comprimento, altura ou profundidade.

Paralelamente com a confiabilidade de ensaios não destrutivos, uma outra ferramenta se torna muito útil quando o objetivo de um projeto é a integridade do equipamento e a segurança no trabalho: a mecânica da fratura. Através dela, é possível determinar o grau de significância de descontinuidades presentes em equipamentos, em outras palavras, a mecânica da fratura pode ajudar a decidir qual descontinuidade pode continuar no equipamento em operação e qual deve ser reparada.

Um procedimento muito utilizado na indústria atualmente para avaliar tamanhos de descontinuidades críticas, através da mecânica da fratura, é o ECA (“*engineering critical assessment*”). Este procedimento fornece subsídios para avaliar a integridade de soldas circunferenciais em dutos na indústria “*offshore*”, como pode ser visto nas normas DNV que serão apresentadas nesse trabalho.

Aplicando o procedimento ECA para determinar o tamanho crítico de uma descontinuidade e utilizando como ferramenta auxiliar as curvas PoD para saber a probabilidade de detecção da mesma, é possível estabelecer uma metodologia completa para analisar a integridade de um equipamento. Isto é, enquanto a metodologia do ECA permite estabelecer as dimensões das descontinuidades que possam vir a comprometer a integridade de um equipamento, a técnica PoD oferece meios de avaliar a probabilidade de detecção desta descontinuidade.

A combinação da metodologia ECA com a técnica PoD oferece uma maneira integrada e otimizada de avaliação da confiabilidade do duto, visando sua integridade.

Este trabalho apresenta essa metodologia descrita, aplicada para descontinuidades produzidas artificialmente, presentes em cordões de solda circunferenciais de dutos de especificação API 5L X70, contendo defeitos de falta de fusão e falta de penetração.

A metodologia foi desenvolvida através da realização de ensaios ultrassônicos (convencional) para obtenção de um banco de dados. Técnicas auxiliares (ultrassom automatizado, ToFD e radiografia) também foram utilizadas com o objetivo de determinar de maneira mais precisa as dimensões dos defeitos envolvidos.

Os resultados de confiabilidade foram obtidos através de curvas ROC, curvas PoD convencionais e multivariadas e demonstram-se ser excelentes ferramentas para quantificar o nível de confiabilidade do sistema.

Concluiu-se que ao correlacionar os resultados de probabilidade de detecção com significância de defeitos, define-se quais dimensões de defeitos críticos efetivamente serão detectados com 90% de PoD.

Capítulo II

Objetivo

O principal objetivo do trabalho é estabelecer uma metodologia para avaliação da integridade de dutos API 5L X70 através de um estudo completo da confiabilidade do ensaio ultrassônico aplicada à significância de defeitos através da mecânica da fratura.

A mecânica da fratura nos permite estabelecer critérios de aceitação da dimensão máxima permitida para defeitos presentes em soldas circunferenciais de dutos, porém conhecer a probabilidade de detecção dessa dimensão demanda uma análise mais completa. Caso a técnica de END utilizada não consiga detectar e dimensionar o tamanho do defeito admissível, somente um estudo da mecânica da fratura não permite avaliar uma situação real.

O estudo da confiabilidade da técnica ultrassônica em soldas circunferenciais permite estabelecer a dimensão que é detectada com 90% de probabilidade de detecção com 95% de intervalo de confiança e comparar este valor com as dimensões estabelecidas com o procedimento ECA.

Para avaliar a confiabilidade, será estudada a técnica ultrassônica manual, técnica amplamente utilizada na indústria *off-shore* na inspeção de dutos. Outros ensaios não destrutivos foram utilizados como ferramentas auxiliares na comprovação da presença de defeitos e no dimensionamento, tais como radiografia, ToFD e ultrassom automatizado. Como ferramenta para quantificar a confiabilidade, foram utilizadas as curvas PoD e ROC.

Capítulo III

Revisão Teórica

III.1 – Conceitos de Confiabilidade

III.1.1 – Introdução a Confiabilidade

Técnicas de END cada vez se consolidam em diversos ramos da engenharia como os principais métodos de avaliação da integridade de um equipamento. Através de inspeções é possível localizar e dimensionar descontinuidades presentes no material, que possam comprometer a vida útil de um equipamento [1].

A necessidade de se conhecer melhor a confiabilidade desses ensaios resultou em uma busca por inúmeras formas de quantificar o quanto o resultado de um ensaio é confiável. Na década de 70 essa questão se tornou um assunto comum e foi possível avaliar os fatores que influenciavam a confiabilidade e, com isso, métodos visando avaliar a eficiência da técnica surgiram [2].

A confiabilidade dos ensaios não destrutivos pode ser definida como “a probabilidade de detecção de uma descontinuidade dentro de um grupo de tamanhos em uma determinada condição de inspeção e um procedimento especificado”. Um ensaio realizado terá um valor de confiabilidade dos resultados obtidos levando-se em consideração fatores de inspeção, do material e humanos [3].

Inspeções repetidas de um defeito de mesmo tipo e mesmo tamanho não necessariamente irão resultar em dados consistentes de “detecção” e “não-detecção”. Por esse motivo, há um diferencial nos resultados de detecção para cada tamanho de defeito e para cada tipo de defeito, e por isso, justamente que a capacidade de detecção é expressa em termos probabilísticos. Desta maneira, é possível visualizar que cada técnica de END possui um valor de confiabilidade intrínseco ao sistema, mas devido a fatores externos, esse valor sofre uma queda. [3].

Em 1997, durante o *1st European-American Workshop* realizado em Berlin, foi adotado um modelo de confiabilidade que ilustra essa situação. Segundo este modelo, existem três funções que descrevem a confiabilidade de um ensaio não destrutivo adotado. A primeira função representa a própria limitação intrínseca do sistema de END adotado. Levando em consideração os fatores externos, podemos ter como funções as

características de aplicações específicas e o fator humano. Desta maneira a equação III.1 e a figura III.1 apresentam o comportamento dessas funções para ilustrar o grau de confiabilidade de detecção de uma descontinuidade, para uma técnica de END adotada [2].

$$R \equiv f(IC) - g(AP) - h(HF)$$

Equação III.1 [2]

onde,

R é a confiabilidade total do sistema;

$f(IC)$ é uma função da capacidade intrínseca do sistema de END;

$g(AP)$ é uma função dos parâmetros aplicados (restrições ao acesso, acabamento superficial do material, etc.);

$h(HF)$ é uma função do fator humano (experiência, treinamento, habilidade, etc.).

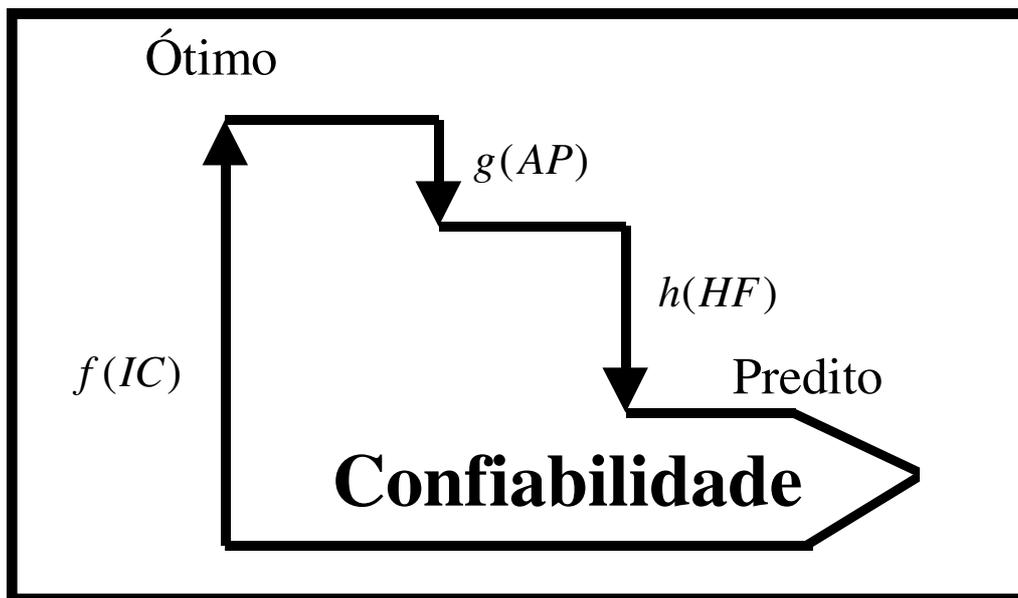


Figura III.1 – Representação ilustrativa da confiabilidade de uma descontinuidade para uma técnica de END adotada [2].

Para conseguir quantificar a confiabilidade de um ensaio não destrutivo, surgiram programas de teste de confiabilidade. Para cada tipo de ensaio, esses testes terão um procedimento diferente levando em consideração os parâmetros utilizados no ensaio [4].

Especificamente, o programa de teste de confiabilidade deve ser conduzido em peças fabricadas para o teste, feitas em laboratório, inserindo defeitos artificialmente. Outra forma também é utilizar algum equipamento previamente já usado na indústria que contenha uma representativa seleção de defeitos bem conhecidos. Adicionalmente, as duas formas de condução do teste podem ser combinadas [4].

O número de defeitos e seus tipos devem ser selecionados visando ter variáveis suficientes na avaliação dos parâmetros e obter uma confiança estatística dos dados [4].

III.1.2 – Fatores que Influenciam a Confiabilidade

Os fatores que podem influenciar uma avaliação exata sobre a presença ou não de uma descontinuidade são inúmeros. Para diferentes inspeções de uma mesma descontinuidade podemos ter diferentes respostas de sinal. Este fator pode estar relacionando a variações momentâneas no ajuste de calibração do equipamento. Além disso, fatores como propriedades do material, geometria, orientação e tipo de defeitos são grandes indicativos de uma interpretação comprometida dos resultados. Fora as questões do equipamento de teste e o do próprio material, a falha humana contribui para a avaliação da confiabilidade. A acuidade mental do inspetor sob fadiga ou um panorama emocional podem contribuir para uma má avaliação dos resultados [2].

O ajuste da calibração do equipamento é o primeiro fator que surge influenciando a confiabilidade de um ensaio não destrutivo. Uma mesma descontinuidade pode apresentar diferentes sinais para diferentes inspeções, utilizando um mesmo equipamento. Por exemplo, no ultrassom, a calibração de ajustes de parâmetros rotineiros como determinação real do ângulo do transdutor, determinação da posição de saída do feixe e calibração da escala horizontal do osciloscópio em função do sinal obtido podem ser realizados com pequenas alterações de uma calibração para outra.

Além disso, a montagem da curva DAC pode ser diferente cada vez que é feita. Desta maneira, para um mesmo sinal, este pode se localizar acima da curva de 50% (defeito deve ser registrado, mas é laudado como aprovado) ou abaixo da curva de 50% (defeito não é registrado).

Quando levamos em consideração o processamento do material, podemos obter diferentes valores de atenuação sônica para cada processo. Tomando como exemplo um aço inoxidável Cr-Ni, cada processamento adotado irá implicar em um valor de

atenuação sônica diferente, como mostra a tabela III.1. Esse material, quando fundido, apresenta uma maior atenuação em comparação com os processos de forjamento e laminação [5].

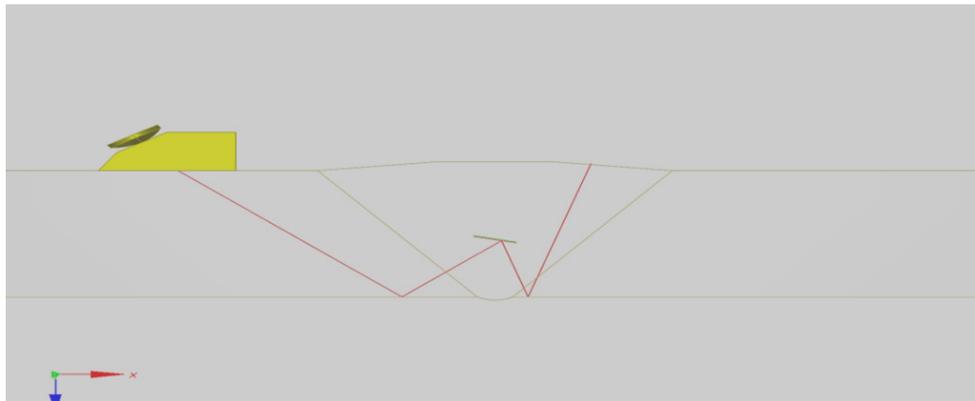
Tabela III.1 – Atenuação sônica para diferentes processamentos de um aço inoxidável Cr-Ni [5]

Material aço Cr-Ni	Atenuação sônica em (dB/mm)
Forjados	0,009 a 0,010
Laminados	0,018
Fundidos	0,04 a 0,08

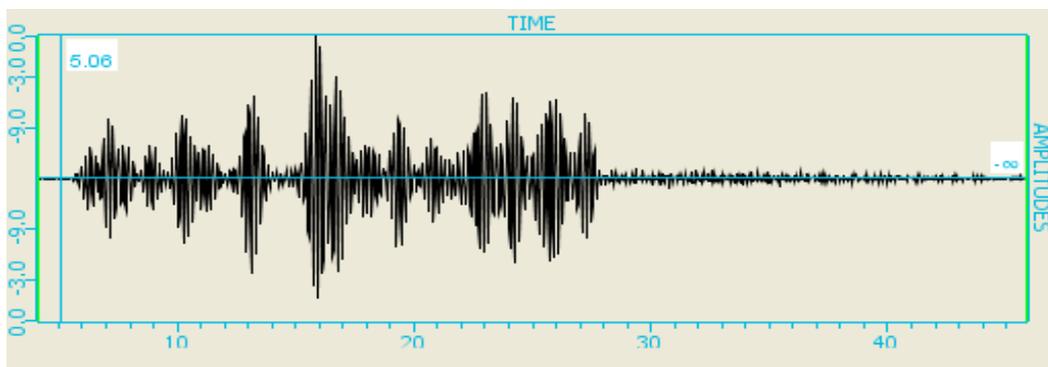
Uma inspeção pode encontrar muitas dificuldades dependendo da geometria do equipamento. Mesmo com inspetores bem qualificados, geometrias complexas podem exigir procedimentos de inspeções mais detalhados e, mesmo assim, podem gerar resultados não tão precisos.

Outro fator que apresenta uma grande influência na confiabilidade de detecção de descontinuidades é a sua orientação. A figura III.2 apresenta uma simulação computacional realizada através do software CIVA versão 9.1a de uma descontinuidade inspecionada pela técnica ultrassônica. É possível reparar que o sinal gerado apresenta muitos ruídos, comprometendo o resultado da inspeção.

Dependendo da orientação da descontinuidade, não só a inspeção ultrassônica é comprometida. Para a descontinuidade apresentada na figura III.2, uma inspeção radiográfica também não iria apresentar uma indicação clara da presença dessa descontinuidade, tendo em vista que a incidência da radiação seria praticamente perpendicular à sua maior dimensão.



(a)



(b)

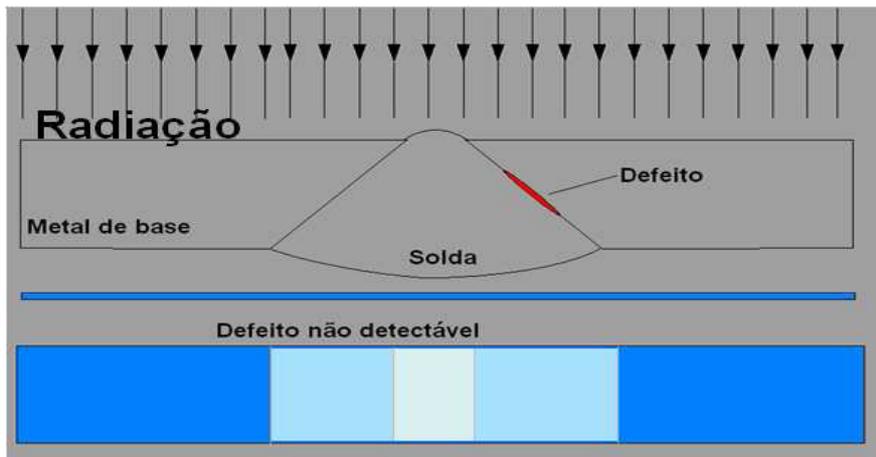
Figura III.2 – Simulação de uma inspeção ultrassônica:

(a) percurso sônico, (b) sinal A-Scan

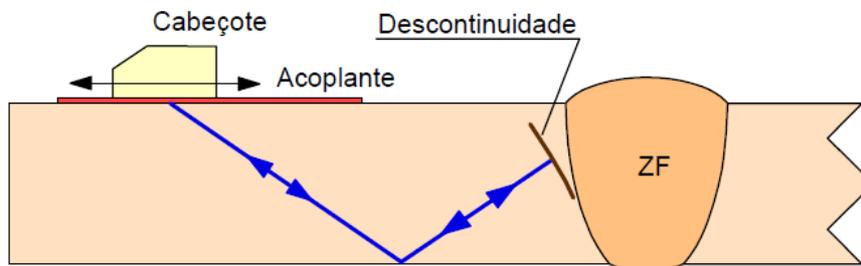
As discontinuidades oriundas de um processo de soldagem podem ser de diversos tipos e cada um desses tipos possui uma técnica mais vantajosa para a sua detecção, enquanto outras possuem desvantagens.

Um defeito de falta de fusão refere-se à ausência de união por fusão entre passes adjacentes de solda ou entre essa e o metal de base. Esta discontinuidade é um concentrador de tensões severo, podendo facilitar a iniciação de trincas, além de reduzir a seção efetiva da solda para resistir a esforços mecânicos [6].

A figura III.3 mostra a inspeção desse tipo de defeito por ultrassom e radiografia. Na radiografia, geralmente, defeitos localizados na parede do chanfro não são detectados quando a incidência é direta. Com a técnica ultrassônica, o defeito é detectado sem dificuldades.



(a)



(b)

Figura III.3 – Ilustração da inspeção de um defeito do tipo falta de fusão:

(a) radiografia [7] e (b) ultrassom [8]

Porosidades são facilmente detectadas pelo ensaio radiográfico, como mostra a figura III.4. Porém, quando utilizamos a técnica ultrassônica para a detecção desse tipo de defeito, o resultado é comprometido pelo tamanho e geometria do mesmo. A figura III.5 ilustra um resultado da inspeção ultrassônica através de simulação computacional de uma porosidade.

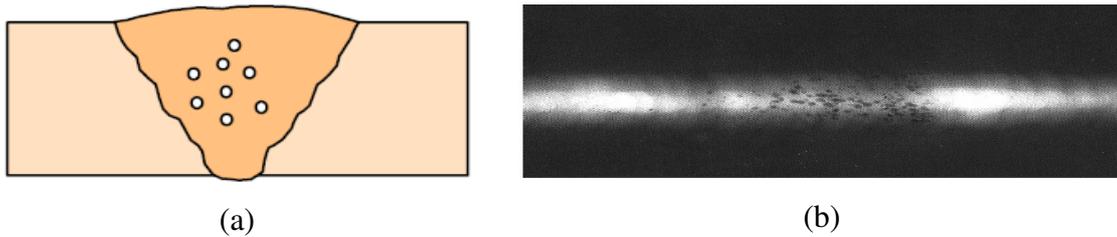
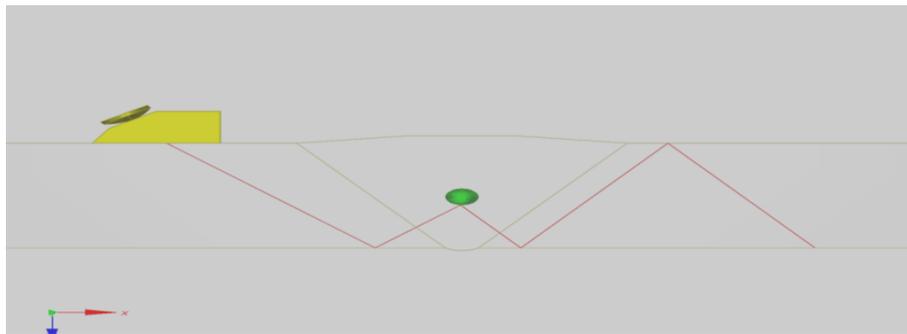


Figura III.4 – Inspeção radiográfica de porosidades:

(a) esquema de um corte transversal do cordão [6] e (b) filme radiográfico [6]



(a)

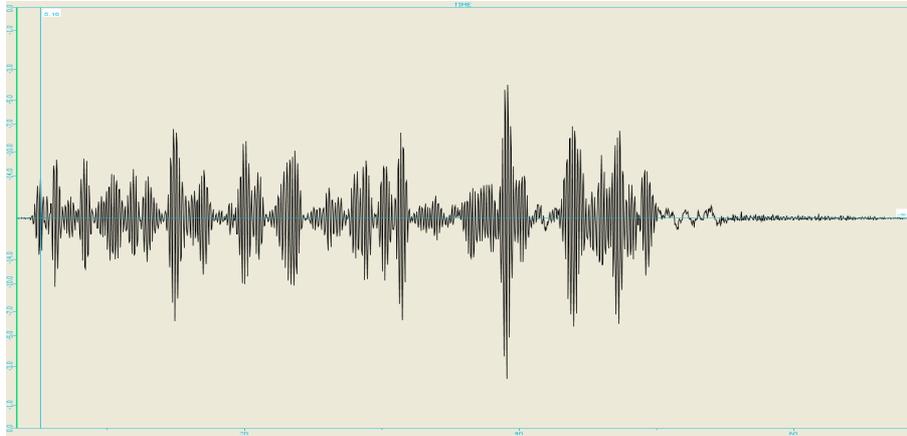


Figura III.5 – Simulação de uma inspeção ultrassônica de uma porosidade:

(a) percurso sônico e (b) sinal A-Scan

Mesmo com todos os fatores operacionais que possam comprometer a detectabilidade de uma descontinuidade, o fator principal durante uma inspeção é a falha humana. Qualquer ensaio não destrutivo que seja manual, isto é, que necessite de

um operador durante todo o procedimento de inspeção, depende fortemente da capacitação, acuidade mental e do panorama emocional do inspetor [1].

É muito simples mostrar diferenças significativas na capacidade de detecção baseada em estudos de confiabilidade humana. No ensaio ultrassônico manual, uma anedota frequentemente citada é “você só pode acreditar que um resultado de uma inspeção manual ultrassônica é correto em 50% do tempo”. Talvez esse fato tenha originado diferenças típicas observadas no passado [3].

A figura III.6 mostra como para a inspeção de um mesmo corpo de prova, podemos obter diferentes resultados quando utilizamos inspetores diferentes. Essa diferença pode ficar mais clara quando ampliamos o número de inspetores. É possível ver que, para um exemplo de uma descontinuidade de 40mm, podemos ter probabilidades de detecção que variam de 60 para 70%, para diferentes operadores [1].

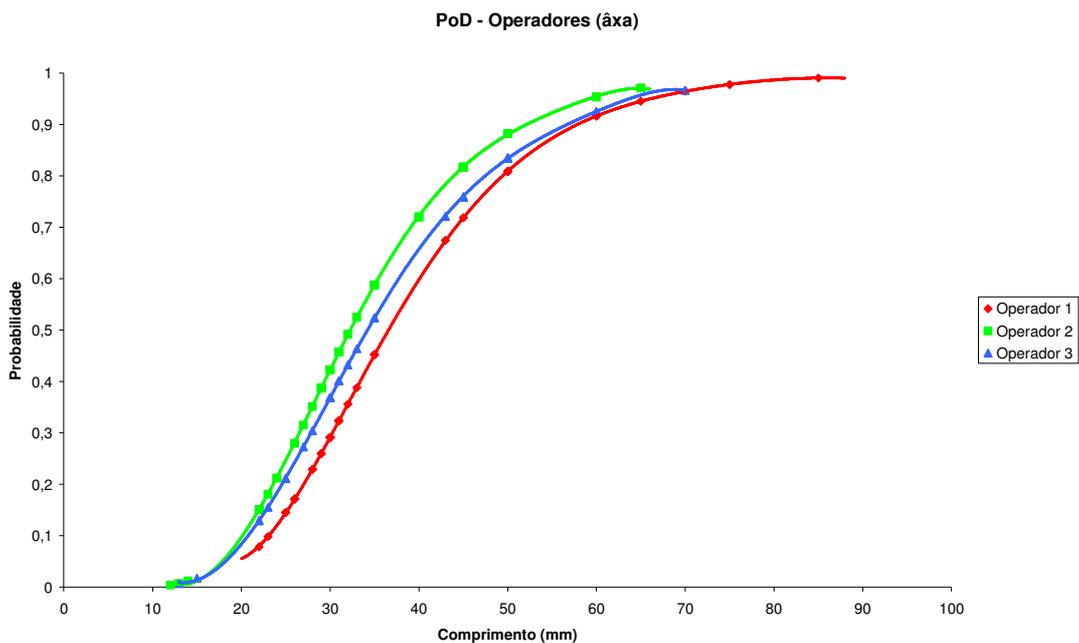


Figura III.6 – Efeito humano na probabilidade de detecção por ultrassom [1]

III.1.3 – Inspeção Baseada em Risco (RBI) e Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM)

O princípio de uma Inspeção Baseada em Risco (*Risk Based Inspection* – RBI) é quantificar as conseqüências de uma possível falha estrutural, como por exemplo um vazamento de um duto. Em outras palavras, esse conceito calcula a probabilidade desse evento ocorrer. Com essa ferramenta, podemos definir planos de inspeção que se adéquem com o acúmulo de danos que o equipamento venha a sofrer [9].

O documento API 581 – *Risk Based Inspection* é atualmente uma excelente metodologia que contém procedimentos completos de cálculos que permitem determinar a probabilidade de ocorrência de uma falha estrutural e suas conseqüências. Isto é possível através das características do projeto, sua operação e inspeção [10].

No conceito de RBI o resultado de inspeções anteriores pode ser utilizado para programar a próxima inspeção, diferentemente do conceito de inspeções periódicas. Essas inspeções demandam tempo e dinheiro e, muitas vezes após todo este trabalho, nenhuma ação é necessária [2].

A figura III.7 apresenta genericamente a curva de projeto (curva O) de um equipamento. A vida útil está no eixo x e o índice de confiabilidade β no eixo y . Desta forma, baseado na curva de projeto, assumindo um nível de confiabilidade, a primeira inspeção será realizada com aproximadamente 6 anos de operação equipamento. Conhecendo o tamanho da trinca presente, na próxima inspeção especula-se que a trinca tenha crescido até chegar ao tamanho $E[a]$. Se o tamanho real for maior ou menor que $E[a]$, é possível reprogramar a futura inspeção [2].

A curva A representa a confiabilidade após incorporar na análise o resultado de não detecção de trinca durante a inspeção realizada. Isto indica que a trinca não está crescendo como se imaginava e com isto a confiabilidade é maior do que a prevista inicialmente. Pode-se observar então que, para o mesmo nível de confiabilidade (ou mesmo nível de risco) assumido na primeira inspeção, o prazo da segunda inspeção torna-se maior e, portanto, o custo global de manutenção da estrutura ou equipamento diminui. A curva B ilustra genericamente o caso de detecção de uma trinca com um tamanho menor que o esperado e aponta para um prazo mais curto para a segunda inspeção. A curva C ilustra o caso de detecção de uma trinca cujo tamanho é maior que o valor esperado. Neste último caso, indica-se uma re-avaliação da estrutura (ou equipamento) para decidir sobre repará-la ou não imediatamente [2].

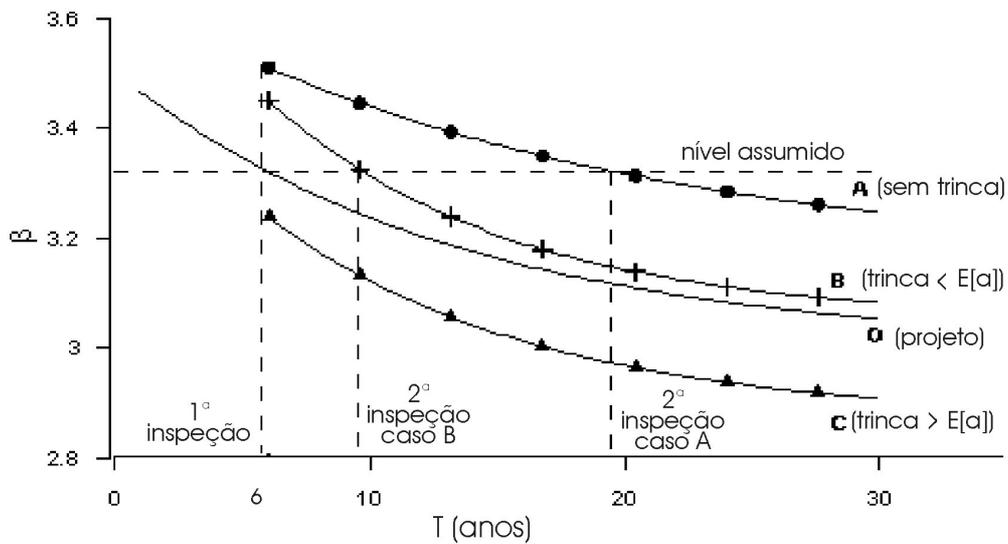


Figura III.7 – Curva de projeto [2]

O documento API 581 descreve uma metodologia para se analisar a confiabilidade de um equipamento dada pelo mapa de risco. O mapa de risco é uma matriz formada por uma relação entre probabilidade de risco e conseqüências [9,10].

A probabilidade nesse caso é função da avaliação das taxas de acúmulo de dano e a confiabilidade da inspeção. Dessa forma, um aumento da probabilidade indica um risco maior à estrutura oriundo de um grande acúmulo de dano e uma péssima inspeção. A probabilidade de risco nessa avaliação varia de 1 a 5, onde 5 é a maior probabilidade de risco [9,10].

Podemos definir a categoria conseqüência pela área afetada pela falha, como um vazamento, por exemplo. A área é dada em ft^2 e para faixas diferentes dessa área, temos uma classificação que vai de A até E, onde E é a maior área afetada. A tabela III.2 apresenta a definição das categorias apresentadas [9,10].

Tabela III.2 – Definições de área afetada e probabilidade de risco [9].

Área afetada	Probabilidade de risco
A	1
B	2
C	3
D	4
E	5

A figura III.8 apresenta o esquema de uma mapa de risco. Este esquema refere-se aos valores dados da tabela III.2. As cores do mapa ajudam a indicar o grau de risco que o sistema, apresenta nas situações em que opera. Assim, caso o material possua uma pequena área afetada por falha e um dano acumulado baixo, consideramos uma situação de risco baixo. Caso a situação seja diferente, ou seja, um grande acúmulo de dano seguido de uma grande área afetada, o risco será alto [9].

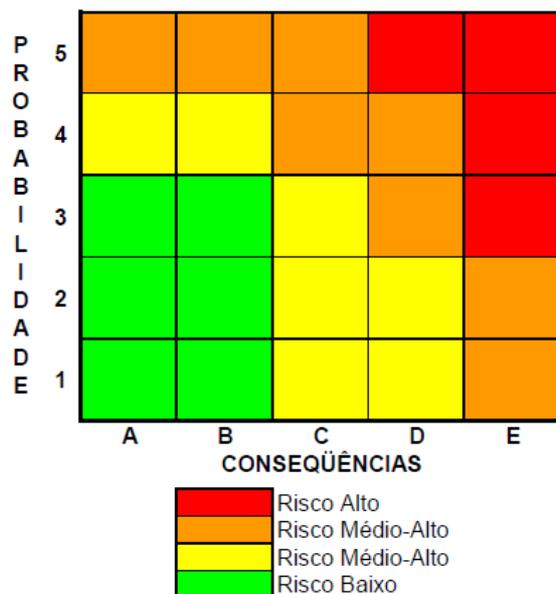


Figura III.8 – Mapa de risco [9]

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (*Reliability Centred Maintenance – RCM*) é uma metodologia que permite transformar relações entre os empreendimentos, itens físicos e o pessoal encarregado de operar e manter os equipamentos. Há uma abertura para que novos itens sejam aderidos ao sistema e estejam em funcionamento com rapidez, segurança e precisão [11].

A melhor maneira de definir RCM seria “um processo usado para determinar o que precisa ser feito para assegurar que qualquer item físico continue a cumprir as funções desejadas, no seu contexto operacional atual” [11].

Primeiramente, é preciso saber quais serão os itens que entrarão na análise e quais deles vão ser submetidos ao processo de revisão da RCM. Para isso, um registro completo da instalação é de suma importância. Desta maneira, para cada item selecionado, devemos aplicar o seguinte questionário [11]:

1. Quais são as funções e padrões de desempenho do item no seu contexto operacional atual?
2. De que forma ele falha em cumprir suas funções?
3. O que causa cada falha funcional (modos de falhas ou mecanismos de danos)?
4. O que acontece quando ocorre cada falha?
5. De que forma cada falha tem importância?
6. O que pode ser feito para prevenir cada falha?
7. O que deve ser feito, se não for encontrada uma tarefa preventiva apropriada?

Com uma falha funcional identificada, o próximo passo é a possível identificação dos modos de falha. Conhecendo o modo de falha, podemos planejar como impedi-la [11].

A identificação da causa de cada falha é importante para poder assegurar o tratamento dos sintomas. Se uma falha provoca sérias conseqüências, esforços não devem ser medidos para tentar evitá-la. Porém, se o efeito da falha é mínimo, podemos optar por não realizar uma ação preventiva complexa [11].

III.1.4 – Probabilidade de Detecção e Curvas PoD

III.1.4.1 – Probabilidade de Detecção

Uma ferramenta para quantificar a confiabilidade de detecção de uma técnica de END que apresenta excelentes resultados é a probabilidade de detecção. Como foi visto anteriormente no item III.1.2, inúmeros fatores podem influenciar no resultado de uma inspeção. Uma mesma descontinuidade pode apresentar diferentes resultados de inspeção se forem avaliadas por diferentes inspetores, calibrações, aparelhos, etc.

Para essa descontinuidade, sabendo que foi inspecionada 10 vezes, vamos supor que somente 3 dos resultados apresentaram uma indicação da presença de um defeito. É fácil visualizar que esta descontinuidade possui 30% de detectabilidade analisando a amostra de 10 inspeções. Desta forma, uma maneira simples de calcular a probabilidade de detecção de uma descontinuidade pode ser através da sua proporção de detecção. A equação III.2 apresenta a representação matemática dessa proporção.

$$p = \frac{k}{m}$$

Equação III.2 [12]

onde,

k é o número de detecções realizadas com sucesso

m é o número de inspeções de um defeito

Alternativamente, a equação III.2 pode ser calculada para m defeitos distintos que apresentem características similares. O valor de k para este caso representará o número de defeitos que foram detectados dos m defeitos inspecionados.

A proporção de detecção descreve a confiabilidade de detecção da descontinuidade inspecionada. Para que esse valor apresente um resultado estatisticamente mais confiável, o número de inspeções deve ser o maior possível. Assim, quanto maior a amostragem, mais próxima a proporção estará da real probabilidade de detecção.

Quando desejamos analisar individualmente um defeito, a proporção de detecção é válida, porém quando queremos descrever o comportamento da probabilidade de detecção em função de uma variável, como o tamanho das descontinuidades, é necessário utilizar uma outra abordagem. Para esse caso, desenvolvemos as curvas PoD.

III.1.4.2 – Curvas PoD

A confiabilidade de detecção de defeitos é utilizada para se delimitar bem as condições de segurança de um ensaio não destrutivo. Desta maneira, surgem as curvas PoD que descrevem a variação de confiabilidade de um ensaio não destrutivo em função de uma dimensão da descontinuidade [1].

A curva PoD é uma curva matemática similar a uma função cumulativa de probabilidades (variando entre 0 e 1). Essa função é uma distribuição de probabilidades de detecção para diferentes tamanhos de defeito. Sendo assim, encontramos na literatura descrita como $PoD(a)$, onde a é o tamanho do defeito. A figura III.9 mostra o aspecto de uma curva PoD ideal e uma curva PoD real [2].

É conhecido que, em uma técnica ideal, a probabilidade de detecção de defeitos menores que um tamanho crítico específico é igual a 0. Da mesma forma, a probabilidade de detecção de um defeito maior que este tamanho crítico específico é 1 (100%). Na figura III.9, o caso ideal apresentou um tamanho $a_{crítico}$ e, abaixo desse

valor, a técnica não detectou as discontinuidades. Por outro lado, para valores acima do crítico, todas as dimensões foram detectadas com 100% de probabilidade. O caso real já apresenta um aspecto bem diferente em função de possuir regiões de incertezas com falsas indicações e defeitos existentes não detectados [2].

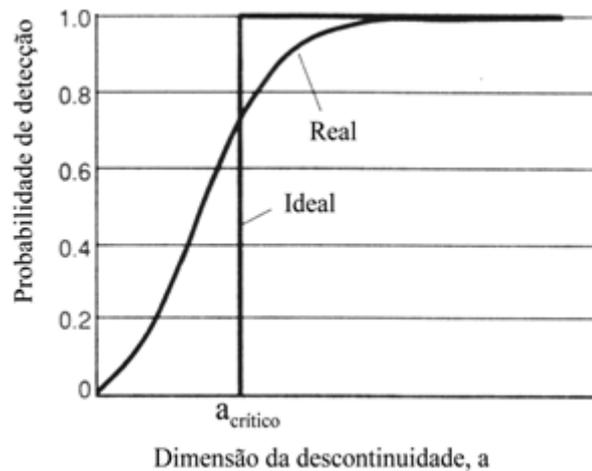


Figura III.9 – Comparação entre uma curva PoD ideal e real

Atualmente, existem algumas metodologias de construção de curvas PoD. Em geral, as curvas podem ser construídas de duas maneiras: com uma base de dados experimentais e através de modelagem matemática. Pesquisas mais recentes sugerem a construção de curvas através de simulação computacional de inspeções [3].

Tanto curvas construídas somente como base experimental quanto as modeladas necessitam de um banco de dados de inspeções realizadas. As curvas PoD geradas por simulação computacional seriam desenvolvidas, em princípio, sem nenhuma inspeção real (os resultados de inspeção seriam simulados) e, em seguida, poderia ser aplicada uma metodologia empírica ou modelada.

Curvas geradas a partir de uma base experimental (empírica) necessitam de um volume de dados muito grande para ter uma confiabilidade estatística adequada. Com o objetivo de minimizar o número de inspeções necessárias, surgiu a modelagem desenvolvida a partir de uma quantidade mais limitada de dados experimentais.

III.1.4.3 – Curvas Experimentais

Baseado em ensaios experimentais, podemos desenvolver curvas PoD em função dos resultados das inspeções. Neste caso, é necessário um banco de dados de grande volume que será avaliado. Por este motivo, um número significativo de amostras com diversos defeitos inseridos artificialmente são necessários para a montagem desse banco de dados.

Além do número de defeitos ser elevado, surge a necessidade de se obter inspeções, de preferência, realizadas por diferentes inspetores. Desta maneira, garante-se que o volume do banco de dados irá reproduzir mais adequadamente situações reais encontradas em campo. Visando reproduzir essa situação de campo, os defeitos inseridos artificialmente devem possuir diferentes dimensões, localizações e tipos diversos.

Com os dados obtidos experimentalmente, a curva PoD pode ser construída através da equação III.2. Calculando a proporção de detecção para cada descontinuidade de dimensão a , iremos obter a probabilidade de detecção da técnica escolhida em função da dimensão utilizada.

III.1.4.4 – Curvas Modeladas

Durante as últimas duas décadas, a modelagem da confiabilidade de ensaios não destrutivos foi aprimorada substancialmente. Um dos motivos principais para sua vasta utilização foi a dificuldade encontrada em se desenvolver curvas PoD somente com base experimental. A medição experimental dessas probabilidades é dispendiosa e possui parâmetros estatísticos de baixa qualidade [3, 14].

Como já é bem conhecido, as técnicas de ensaios não destrutivos não são perfeitas e cada vez mais se torna mais comum a prática de quantificar a confiabilidade de uma descontinuidade em termos da probabilidade de detecção (PoD) e da probabilidade de falso alarme (PFA). Com isso, surgiu a modelagem matemática como uma ferramenta de desenvolvimento da curva PoD [14].

Compreendendo e quantificando a confiabilidade é possível avaliar quais serão as melhores condições para uma inspeção e, desta forma, melhorar a confiabilidade de detecção do ensaio [14].

Ao utilizar a modelagem matemática, parâmetros de inspeção podem ser pré-definidos, permitindo ao inspetor decidir as melhores condições de ensaio, resultando

em um melhor desempenho da técnica escolhida. Outra vantagem dos modelos é a quantificação da probabilidade de falso alarme que, em muitos dos casos, é conhecida sua presença, mas sem conhecer sua criticidade [14].

Modelos possibilitam otimizar um procedimento de inspeção, visando reduzir tempo e custos desnecessários. Contudo, a modelagem não é uma ferramenta trivial, necessitando de *softwares* específicos que demandam um especialista.

Dentro da confiabilidade dos ensaios não destrutivos, existem dois métodos probabilísticos para analisar a confiabilidade dos dados e desenvolver uma curva PoD em função do tamanho de defeito a . Em um primeiro tipo, os resultados desses ensaios são somente registrados em termos de se o defeito foi detectado ou não. Esse tipo de dado é chamado de *hit/miss* e é muito apropriado para ensaios não destrutivos como, por exemplo, líquido penetrante e partícula magnética [3].

Entretanto, em muitos sistemas de ensaios não destrutivos, temos uma informação referente ao sinal de resposta (pico de voltagem em correntes parasitas, amplitude de sinal em ensaios ultra-sônicos, intensidade da luz fluorescente em líquido penetrante). Desde que o sinal de resposta possa ser interpretado como função do tamanho do defeito, esse dado é denominado \hat{a} ('a hat' em inglês) [3].

Os dois métodos de avaliação de dados podem ser utilizados na modelagem da curva PoD, porém os resultados serão diferentes se aplicarmos os dois métodos de análise para o mesmo conjunto de dados [3].

A modelagem matemática de curvas PoD possui inúmeras equações que são utilizadas. Mesmo com tantas opções a se escolher para aplicar uma modelagem, o resultado apresentado por essas opções apresenta na grande maioria das vezes é muito semelhante. Em geral, não é possível afirmar que um modelo é melhor do que outro. As equações III.3, III.4 e III.5 são expressões usadas na modelagem matemática da curva PoD. Todas elas utilizam os mesmos parâmetros estatísticos: média e desvio padrão [2, 3, 12, 14-16] .

$$PoD(a) = \frac{e^{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{\ln a - m}{\sigma} \right)}}{1 + e^{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{\ln a - m}{\sigma} \right)}} \quad \text{Equação III.3 [3]}$$

$$PoD(a) = \frac{e^{\left(\frac{\log a - m}{\sigma} \right)}}{1 + e^{\left(\frac{\log a - m}{\sigma} \right)}} \quad \text{Equação III.4 [15]}$$

$$PoD(a) = \phi\left(\frac{\log a - m}{\sigma}\right) \quad \text{Equação III.5 [3, 15]}$$

onde:

a é o tamanho do defeito;

m é a média dos tamanhos dos defeitos;

σ é o desvio padrão dos tamanhos de defeitos.

A equação III.5 é uma curva de distribuição log-normal. Além de apresentar um bom resultado na modelagem, a função apresenta uma vantagem em relação às outras funções por ser uma expressão bem conhecida e já disponível como ferramenta na maioria de *softwares* que trabalham com análise de dados, como Microsoft Excel[®] e Matlab[®].

Com os dados experimentais obtidos, forma-se um banco de dados com os resultados da inspeção. Calculando facilmente a média e o desvio padrão da amostra, é possível aplicar as equações de modelagem. Para cada tamanho de defeito a , é possível obter o respectivo valor de probabilidade de detecção.

III.1.4.5 – Curvas por Simulação Física de Descontinuidades

A detecção de uma descontinuidade pode estar relacionada a diversos fatores. No entanto, no caso de um ensaio ultrassônico, se considerarmos como influência somente a posição do defeito em uma rede de transdutores, em outras palavras, a localização do defeito dentro de um arranjo geométrico de pontos de inspeção, pode-se construir a curva PoD analiticamente [2].

Imagine um modelo físico de uma rede de pontos de inspeção que podem ser descritos por um sistema ultrassônico automatizado ou por diferentes posições dos cabeçotes ao longo de peça. Considerando a área a ser inspecionada como uma rede

onde a distância ente os transdutores é l_t e a distância entre duas aquisições consecutivas é l_a . Esse modelo físico pode ser melhor compreendido analisando a figura III.10 [2].

Para o modelo mostrado na figura III.10, vamos considerar que existam dois tipos de geometria de defeitos: retangulares e circulares. A PoD para esse tipo de avaliação é descrita analiticamente pela simulação de Monte Carlo. Esse método tem sido utilizado há bastante tempo como forma de obter aproximações numéricas de funções complexas. Para o caso de descontinuidades com geometria retangular e circular, é possível calcular a curva PoD analítica de modos particulares para cada tipo de geometria. Os modos particulares também são simulações de Monte Carlo [2].

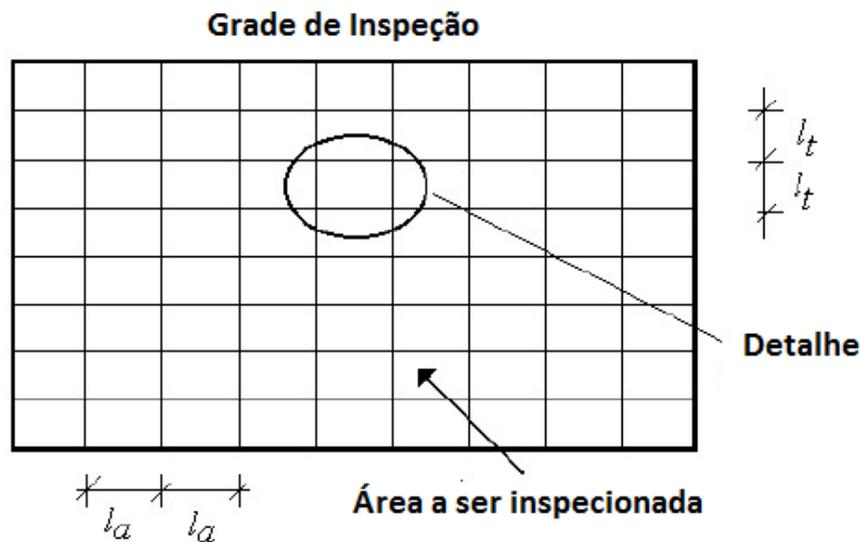


Figura III.10 – Modelo físico da rede de inspeção [16]

III.1.4.6 – Requerimentos Experimentais

Quando trabalhamos com curvas PoD devemos levar em conta os requerimentos experimentais para o desenvolvimento das curvas. Como foi visto no item III.1.4.2, resultados experimentais são de suma importância para a construção de curvas PoD. Até mesmo quando é utilizada a simulação, que não necessitaria de dados experimentais para obter as curvas, a parte experimental deve ser realizada pelo menos uma vez na validação do método. Com isso, surge a necessidade de estabelecer quais requerimentos experimentais que devem ser seguidos para se obter bons parâmetros estatísticos.

A prática recomendada, que foi originalmente preparada pela indústria aeronáutica, proporciona uma informação completa da seqüência experimental de eventos para gerar a curva PoD e validar o ensaio não destrutivo ou o procedimento adotado. A seqüência de eventos pode ser resumida nos seguintes passos [17]:

- ✓ Produzir ou obter defeitos com um número relevante de tamanhos e diferentes tipos;
- ✓ Inspeccionar os defeitos com o ensaio não destrutivo apropriado;
- ✓ Registrar os resultados em função do tamanho do defeito;
- ✓ Criar uma curva PoD em função do tamanho de defeito;

Entretanto, antes de produzir ou obter os defeitos, é necessário responder às seguintes perguntas cruciais [17]:

- ✓ Qual parâmetro do tamanho do defeito vai ser utilizado (comprimento, altura, profundidade)?
- ✓ Qual a escala de distribuição de tamanhos que será investigada?
- ✓ Quantos intervalos são necessários para a escala de tamanhos a ser investigada?

A prática recomendada também proporciona uma informação crítica necessária na escala de tamanhos de defeitos para cada intervalo a fim de demonstrar a desejada curva PoD, juntamente com um apropriado limiar inferior. O limiar inferior refere-se a um tratamento dos sinais obtidos como resultado, isto é, determina-se um valor que funciona como filtro para sinais de baixa amplitude, geralmente oriundos de ruídos. Seguindo o procedimento experimental mencionado, a abordagem deverá conduzir para o tamanho de defeito que se deseja ter uma certa confiabilidade de detecção, que pode ser obtido com a curva PoD e o seu intervalo de confiança [1].

É importante notar que a seleção da escala de tamanhos pode gerar dois problemas. O primeiro é que a escala de tamanhos deve ser grande o suficiente para obter a curva PoD juntamente com seu intervalo de confiança cada vez menor. O segundo, a escala deve ser grande o suficiente para poder computar os parâmetros estatísticos associados com a curva PoD e gerar informações compatíveis com os dados que possuímos [13].

Para se desenvolver uma curva PoD da melhor maneira possível, é importante que os corpos de prova ou o equipamento a serem inspecionados possuam uma quantidade de defeitos suficientemente grande, de forma a representar a situação de trabalho que será confrontada. Além disso, a escala de tamanhos deve ser ampla o bastante para que a curva descreva bem a confiabilidade sem necessidades de extrapolações exageradas da curva.

Por fim, quanto mais inspeções de um mesmo defeito forem realizadas, mais estreito será o intervalo de confiança. Quando são necessários altos valores de confiabilidade, aumentar o número de inspeções se torna uma excelente ferramenta para obtenção desses dados estatísticos de maneira bem refinada.

III.1.5 – Modelagem de Curvas PoD

III.1.5.1 – Tipos de Modelagem

Foi discutida no item III.1.4.4 a importância de modelagem de curvas PoD. Nesse mesmo item, foi mencionado que para trabalhar com a modelagem, é necessário escolher entre dois métodos de análise de dados: *hit/miss* e *â versus a*.

III.1.5.2 – Método de Análise de Dados “*hit/miss*”

A análise de dados *hit/miss* é uma metodologia simples que consiste em analisar o banco de dados das inspeções de maneira binária. Desta forma, todos os defeitos inspecionados que foram detectados com sucesso recebem a denominação *hit*, enquanto defeitos que não foram detectados recebem a denominação *miss* [15].

Como o sistema deve ser binário, defeitos detectados passam a serem representados pela indicação 1. Da mesma forma, os não detectados são indicados por 0. Logo, com o valor do tamanho das descontinuidades e sua indicação binária, é possível montar uma tabela simples para esses valores, como mostra a tabela III.3 [15].

Tabela III.3 – Dados da análise *hit/miss* [15]

Indicação	Deteção	Comprimento de trinca (mm)
1	0	1,25
2	1	3,20
3	0	0,75
4	0	1,60
5	1	2,50
6	0	0,96
7	0	2,15
8	0	0,00
9	1	3,80
10	0	1,25
11	0	0,85
12	1	2,10
13	1	2,80
...
68	1	3,60
69	1	2,05
70	0	1,20

Na tabela III.3 é possível observar que para cada comprimento de trinca, temos uma indicação binária de deteção (1 ou 0). Para o caso da indicação 8 (em amarelo) da tabela III.3, a ausência da descontinuidade é comprovada através da indicação 0 na deteção. Em outras palavras, uma região sem presença de descontinuidades não apresentou nenhum sinal de resposta durante a inspeção. Caso houvesse qualquer tipo de indicação, esta seria considerada uma falsa indicação [15].

Como todos os defeitos detectados recebem a indicação binária 1 (*hit*) e os não detectados recebem 0 (*miss*) é possível observar dois grandes patamares se utilizarmos como ferramenta auxiliar um gráfico para deteção. Para obter tal gráfico é necessário trabalhar com as equações III.6 e III.7 [15].

$$\text{Hit: } PoD(a) = 1$$

Equação III.6 [15]

$$\text{Miss: } PoD(a) = 0$$

Equação III.7 [15]

Desta forma, a figura III.11 apresenta em forma gráfica os patamares de deteção e não deteção em função do tamanho das descontinuidades. É esperado que como descontinuidades pequenas apresentem maior dificuldade da deteção, o patamar

referente a não detecção deve se localizar no canto inferior, na parte esquerda (descontinuidades pequenas). A partir do mesmo raciocínio, descontinuidades grandes são facilmente detectadas, com isso o patamar da detecção se localiza no canto superior direito.

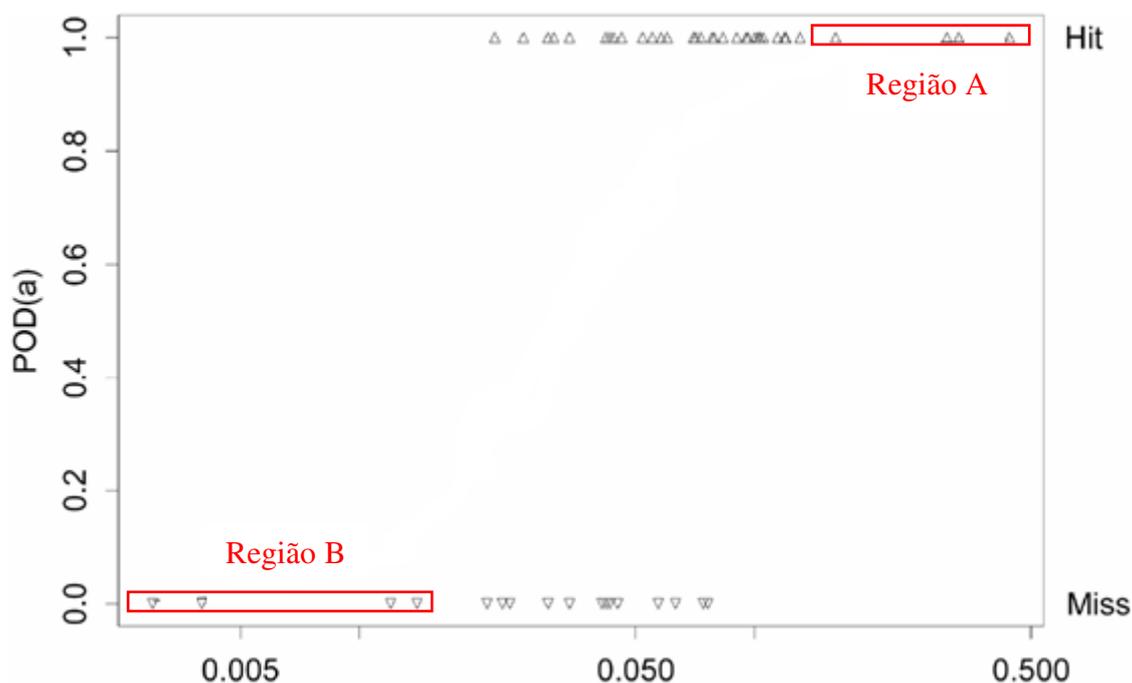


Figura III.11 – Patamares de detecção e não detecção [15]

Na figura III.11, para o patamar de detecção, existem algumas descontinuidades que tiveram 100% de detecção, indicados pela região A. No patamar de não detecção, podemos notar a presença de descontinuidades que nunca foram detectadas (região B). No entanto, surge uma região intermediária onde uma mesma descontinuidade foi detectada em algumas inspeções e não detectada em outras inspeções. Essa região intermediária será modelada matematicamente para uma curva real, como visto anteriormente na figura III.9.

Calculando-se os parâmetros estatísticos do banco de dados montado (média e desvio padrão), podemos modelar a curva PoD utilizando a análise *hit/miss*. As equações III.3, III.4 e III.5 são modelos matemáticos que podem ser aplicados para o desenvolvimento da curva, lembrando que dessas equações a distribuição log-normal é um modelo simples de ser aplicado.

A modelagem da curva PoD para a análise *hit/miss* pode ser observada na figura III.12. Nota-se que a curva descreve a confiabilidade de detecção do banco de dados, começando no menor defeito não detectado e terminando no maior defeito detectado. Para a figura, a escala da dimensão da descontinuidade se encontra em escala logarítmica.

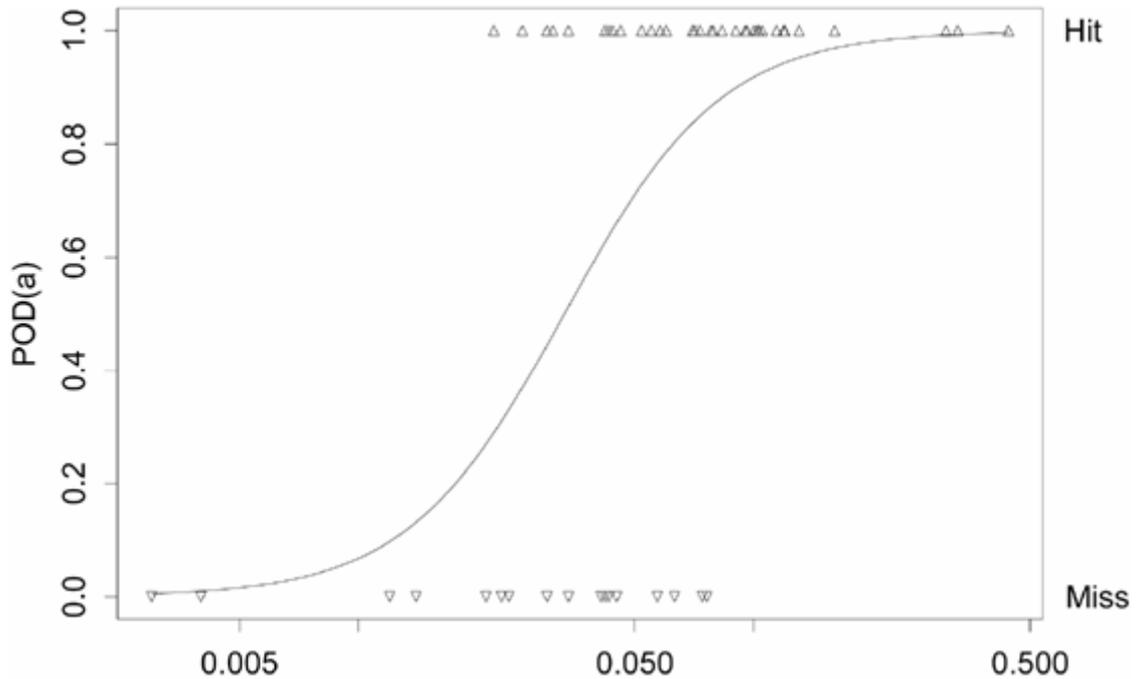


Figura III.12 – Curva PoD (análise *hit/miss*) [18]

III.1.5.3 – Método de Análise de Dados “*â versus a*”

A análise *â versus a* é utilizada quando uma inspeção tem como retorno um sinal de resposta. No caso do ultrassom, o sinal de resposta é a reflexão da onda originada ao encontrar alguma superfície refletora (um defeito, por exemplo). Esse sinal possui uma magnitude que é convertida no tamanho de defeito medido (\hat{a}) em função de um tamanho real de defeito (a). Com isso, temos os seguintes casos de dimensionamento [1]:

✓ $\hat{a} = a$

Tamanho detectado é igual ao tamanho do defeito

✓ $\hat{a} > a$

Tamanho detectado é maior que o tamanho real (sobredimensionamento)

✓ $\hat{a} < a$

Tamanho detectado é menor que o tamanho real (subdimensionamento)

Existem duas maneiras de se trabalhar com a análise de dados \hat{a} versus a : avaliando o sinal obtido e criando limiares do sistema que atuam como filtro ou avaliando o dimensionamento correto da descontinuidade. A primeira metodologia é comumente aplicada quando o sistema possui limitações (ruídos, saturação, *threshold*) e devemos restringir os sinais obtidos. Já a segunda metodologia pode ser aplicada quando a questão do dimensionamento é restringida por norma.

Primeiramente, a primeira metodologia será detalhada. Quando trabalhamos com um sinal de resposta em ensaios ultrassônicos, o resultado da inspeção é uma medida indireta e diversos sinais podem ser gerados de fontes não relevantes (rugosidades, estrutura granular, variações geométricas). Esse tipo de sinal gera um ruído que é inerente ao ensaio.

Para isso, no desenvolvimento da curva PoD, nesse tipo de análise, devemos definir um limiar inferior que representa os sinais oriundos dos ruídos. A figura III.13 mostra a distribuição dos sinais obtidos. O limiar que separa a probabilidade do sinal obtido ser um ruído do restante dos sinais, para este caso, foi definido com 35 [18].

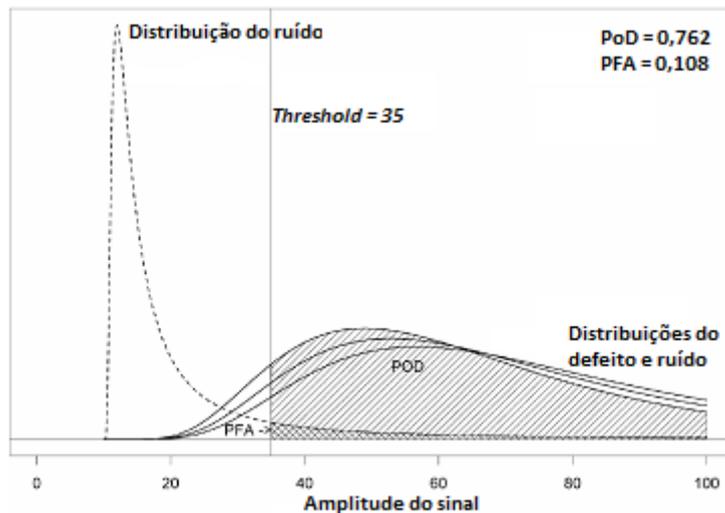


Figura III.13 – Distribuição dos sinais do ultrassom [18]

Como visto na figura III.13, a maioria da distribuição dos ruídos encontra-se abaixo do limiar, resultando em uma probabilidade de falso alarme de somente 10,8%, como mostra a região indicada na figura. Quando se considera um ruído como defeito, a detecção irá ocasionar um alarme falso, acusando a presença de um defeito onde não existe [18].

Além do limiar inferior definido visando separar sinais de ruídos, existe um outro limiar inferior que é referente ao procedimento de inspeção adotado. Em outras palavras, esse limiar pode ser interpretado como o menor sinal registrado pelo sistema. Esse sinal de baixa amplitude pode ser resultado da limitação da técnica ou calibração do equipamento (curva DAC, no caso do ensaio ultrassônico).

Por fim, surge a necessidade de se delimitar outro limiar para o sistema. Esse limiar é oriundo da saturação do sistema, sendo assim um limiar superior. A figura III.14 mostra o sinal obtido da raiz (posição 1) e sinal obtido de um reforço excessivo (posição 2). Esses sinais apresentam uma grande amplitude, mas mesmo assim não são descontinuidades, embora freqüentemente sejam confundidos com essas.

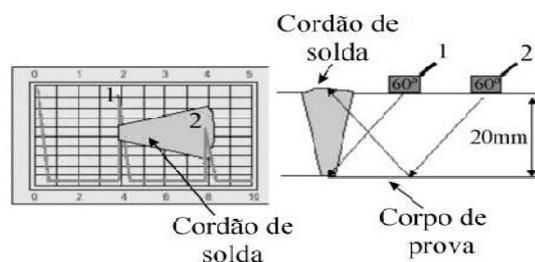


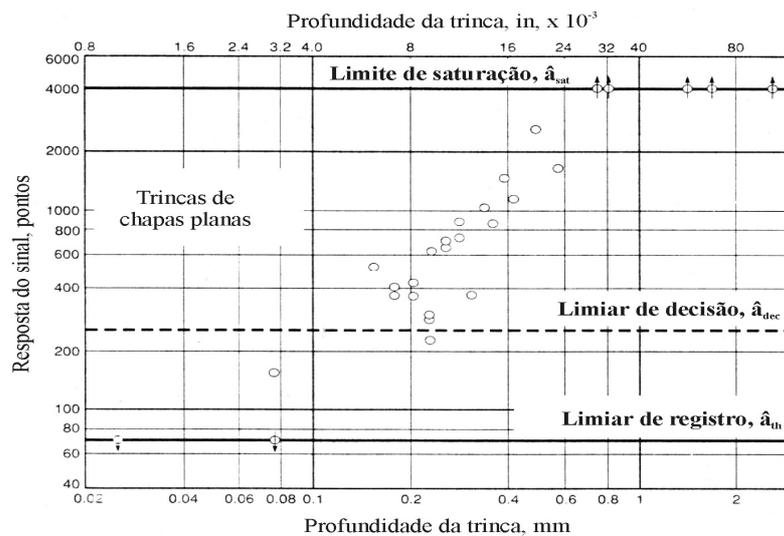
Figura III.14 – Sinais de saturação do sistema ultrassônico

Para os dois limiares inferiores, pode-se trabalhar somente com o maior valor entre eles. A necessidade dos limiares inferiores surge para filtrar sinais de baixa amplitude. Desta forma, a partir do maior sinal que se considere como sendo de uma descontinuidade, a utilização dos dois limiares pode ser desprezada. Para facilitar a identificação de cada limiar corretamente, foram criadas as seguintes nomenclaturas [2]:

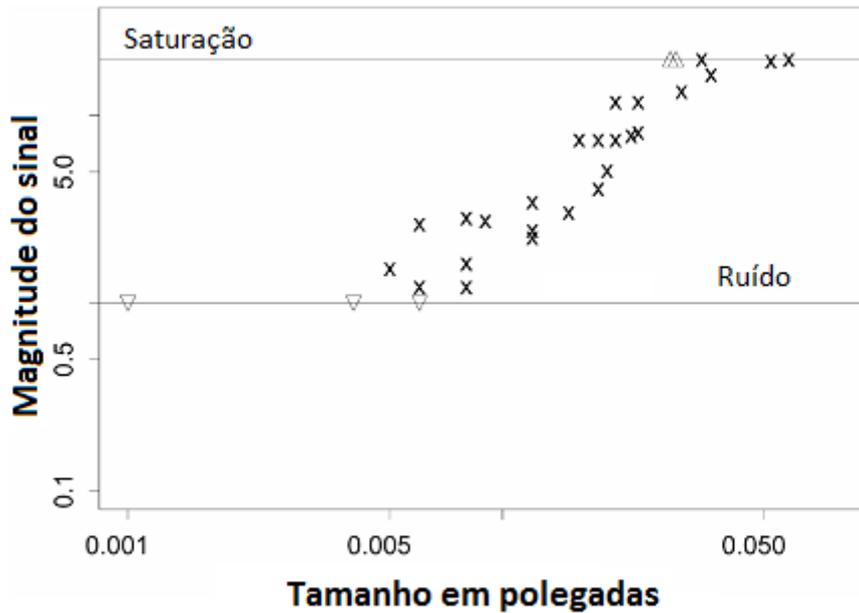
- ✓ Limiar de registro (\hat{a}_{th}) → procedimento de inspeção;
- ✓ Limiar de decisão (\hat{a}_{dec}) → acima desse limiar, todas as descontinuidades serão registradas como detectadas;
- ✓ Limiar de saturação (\hat{a}_{sat}) → limite de saturação do sistema de registro;

As figura III.15 mostra a relação linear das dimensões reais (a) e medidas (\hat{a}) das descontinuidades. Para melhor compreensão da aplicação dos limiares apresentados, esses foram utilizados nos gráficos.

Todos os sinais que se encontram entre os limiares apresentados na figura III.15 são sinais de detecção de descontinuidades. Com isso, podemos considerar esses sinais como sendo *hit*. Sinais que não se localizam entre os limiares e as descontinuidades que não foram detectadas podem ser considerados *miss* [18].



(a)



(b)

Figura III.15 – Limiares superior e inferiores:

(a) três limiares [2] e (b) dois limiares [18]

Transformando a relação entre o valor real e o medido em uma estrutura binária de acerto e erro, podemos aplicar a análise de dados *hit/miss*. Quando se trabalha com o sinal de resposta, podemos modelar a curva PoD através da análise de dados *hit/miss*, porém com um refinamento maior. Para a modelagem, podemos utilizar as mesmas equações III.3, III.4 e III.5.

Cada descontinuidade a pode ser descrita pela sua relação linear de sinal de resposta. Desta maneira, a probabilidade de detecção dessa descontinuidade pode ser representada como uma função de densidade de probabilidade, como mostra a figura III.16 [18].

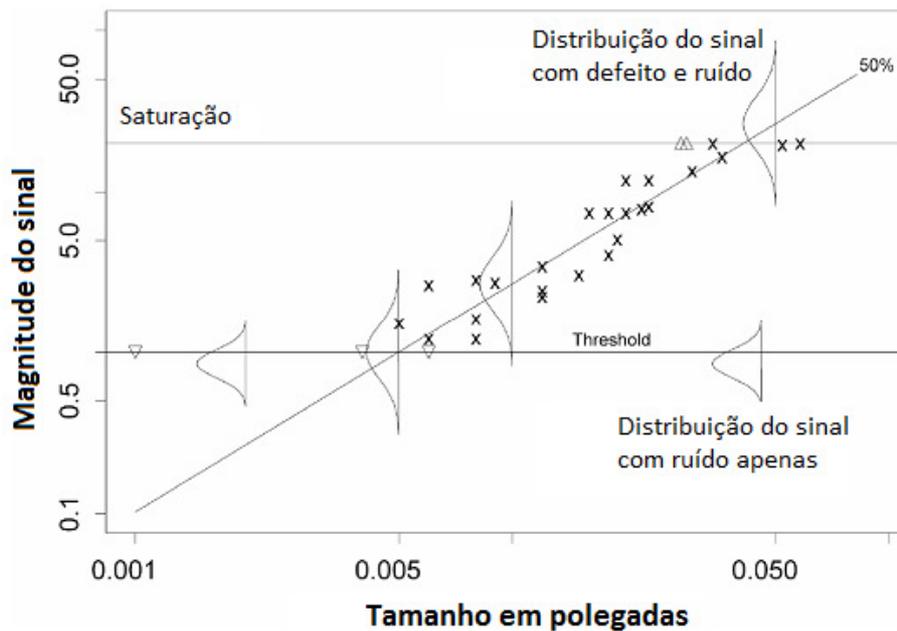


Figura III.16 – Função de densidade de probabilidade [18]

Quando um sinal se aproxima muito dos limiares, temos que sua probabilidade de detecção será a área entre a função de densidade de probabilidade e o limiar. Podemos observar como seria essa probabilidade através da figura III.17 [18].

Para o exemplo da figura III.17, a PoD pode ser expressa da seguinte forma:

$$\text{PoD}(a) = \text{Probabilidade} [\ln(\hat{a}) > \ln(\hat{a}_{\text{dec}})]$$

Equação III.8 [15]

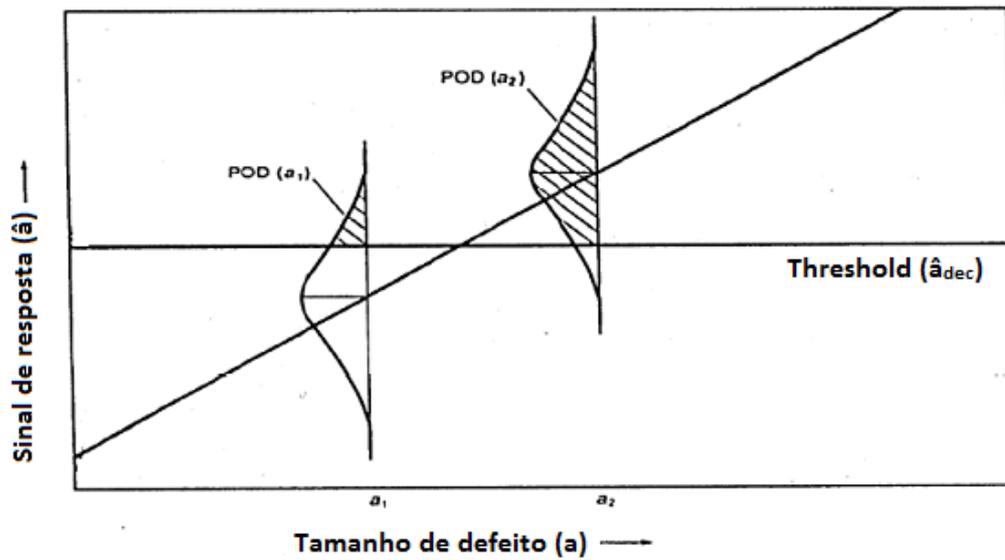


Figura III.17 - Determinação da PoD de sinais próximos aos limiares [18]

A figura III.18 mostra uma curva PoD modelada utilizando a análise \hat{a} versus a , onde os sinais resultantes dos ensaios foram filtrados por limiares. Para esse exemplo, o limiar inferior variou de 1 até 1,6. Pode-se observar que a curva PoD é influenciada pelo sinal de resposta obtido. Para ensaios ultrassônicos, a amplitude do sinal está intimamente ligada à altura da descontinuidade.

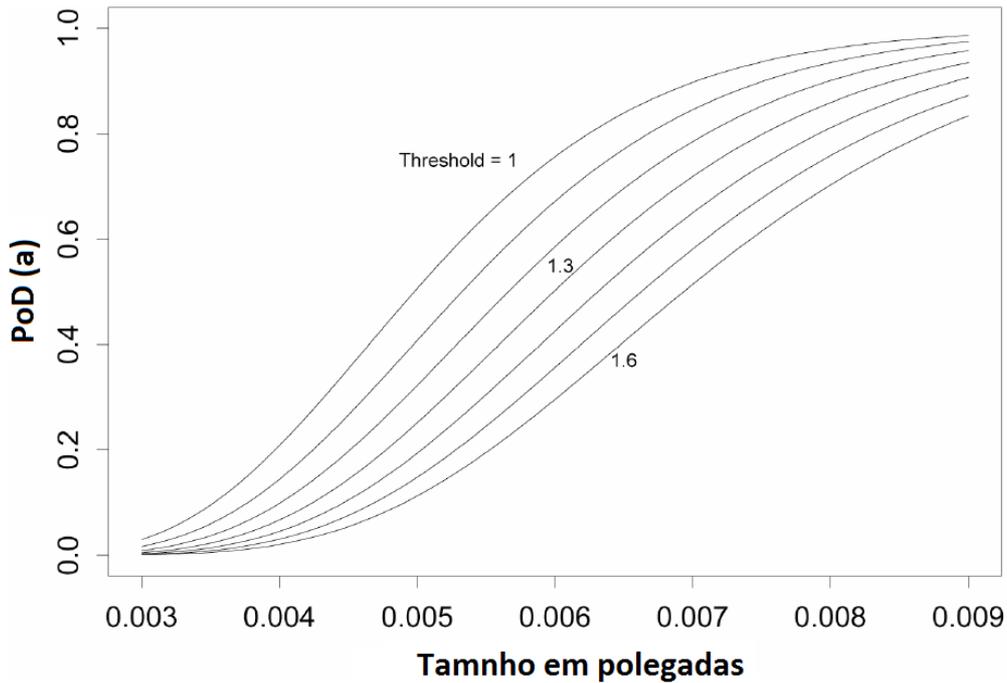


Figura III.18 – Curva PoD (análise \hat{a} versus a) [18]

O sinal de resposta pode ser utilizado na análise de dados \hat{a} versus a com finalidade diferente de filtrar sinais. Uma segunda metodologia dessa análise de dados seria construir uma curva PoD onde o dimensionamento seja uma importante variável. Algumas normas que serão vistas futuramente neste trabalho sugerem não somente desenvolver uma curva PoD, mas sim desenvolvê-la considerando o dimensionamento.

O sobredimensionamento ocorre quando o valor medido pela técnica de END retorna sendo maior que o valor real de descontinuidade. Quando isso ocorre em campo, podemos solicitar o reparo de um equipamento, sendo que este possui uma descontinuidade menor do que se acredita que esta seja. O reparo neste caso é desnecessário e implicará em um custo.

O caso mais perigoso ocorre quando temos um subdimensionamento. Quando a dimensão da descontinuidade é dada por um valor menor que ela realmente possui, podemos estar colocando nosso equipamento em risco. O reparo neste caso pode ser necessário, porém acredita-se que a descontinuidade seja pequena.

Considerando o dimensionamento da descontinuidade como um fator de confiança do sistema, a análise \hat{a} versus a se torna uma grande ferramenta. Ao invés de se criar limiares na distribuição linear dos sinais obtidos, podemos criar “limiares”

individuais para cada uma das descontinuidades detectadas. Esses “limiares” acabam se tornando geralmente uma porcentagem de sobredimensionamento/subdimensionamento.

Para um banco de dados qualquer, podemos facilmente observar visualmente a questão do dimensionamento através da relação linear entre os valores de dimensão reais e medidos das descontinuidades. A figura III.19 apresenta essa relação e a linha tracejada indica o dimensionamento correto das descontinuidades. Acima da linha tracejada, temos um sobredimensionamento enquanto abaixo da linha, temos um subdimensionamento.

Para esse banco de dados, foi escolhida a tolerância de 25% do tamanho do defeito, tanto para cima quanto para baixo. Logo, a barra de erro do gráfico da figura III.19 indica a região onde as descontinuidade além de detectadas, foram dimensionadas dentro da tolerância de 25%.

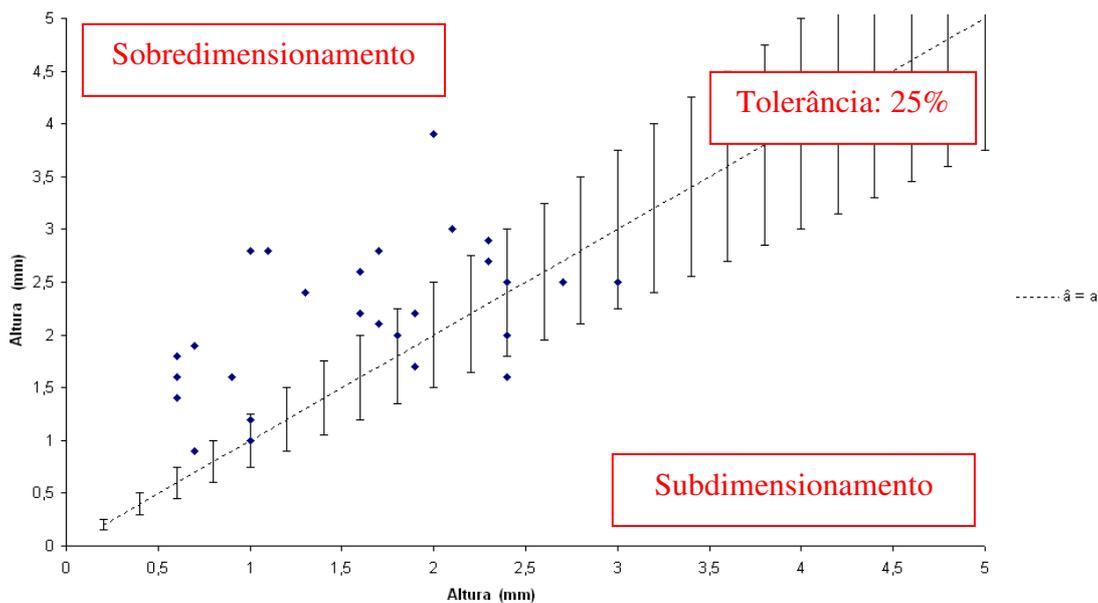


Figura III.19 – Relação linear de alturas reais e medidas

No caso da figura III.19, as barras de erro indicaram o que seria a região delimitada pelos limiares da primeira metodologia. Sendo assim, todas as descontinuidades localizadas nessa região podem ser consideradas como *hit*, assim como as descontinuidades não detectadas e as que não se localizam na região de

tolerância podem ser consideradas como *miss*. Assim como a primeira metodologia, voltamos a análise de dados *hit/miss*.

A primeira metodologia da análise \hat{a} versus a é a mais empregada nesse tipo de análise. O seu passo a passo pode ser descrito de forma esquemática pela figura III.20. Na figura é possível acompanhar desde a medição do sinal de resposta até a curva PoD propriamente dita [2].

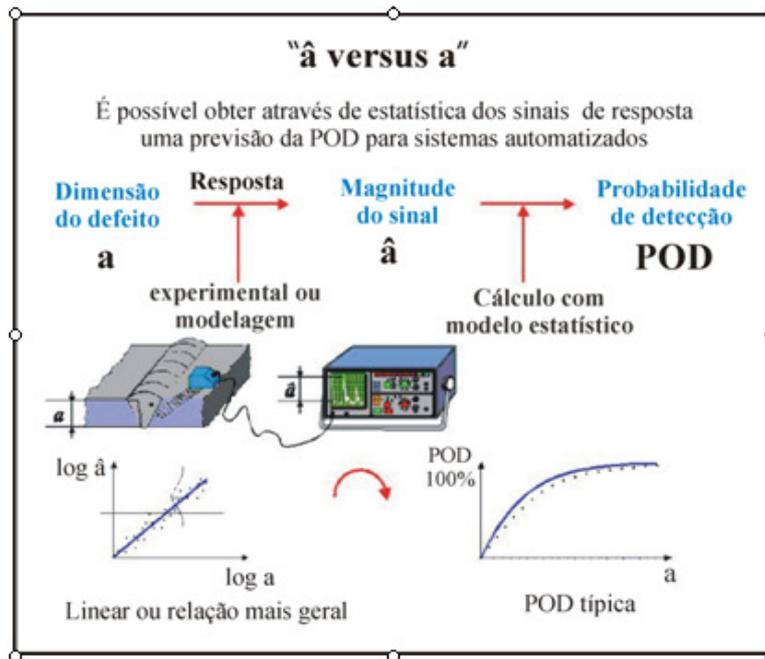


Figura III.20 – Esquema da análise \hat{a} versus a [2]

III.1.6 – Curvas PoD em Dutos

III.1.6.1 – Ultrassom Automatizado (AUT)

Inspecções por ensaios não destrutivos em dutos da indústria *off-shore* são práticas comuns, desde a sua instalação até a manutenção. O ensaio ultrassônico é uma prática de avaliação de presença de descontinuidade que sempre produz bons resultados. Visando obter agilidade na inspeção e aumentar a confiabilidade do ensaio, utiliza-se a técnica ultrassônica automatizada (AUT).

O ensaio consiste em uma inspeção em soldas circunferenciais, geralmente realizadas para união de tubos. A técnica permite uma inspeção completa, passando pelo metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e o cordão de solda. Essa inspeção permite uma varredura dos dois lados da junta soldada, facilitando a

localização da descontinuidade. A figura III.21 apresenta o equipamento utilizado na inspeção automatizada (AUT) [26].

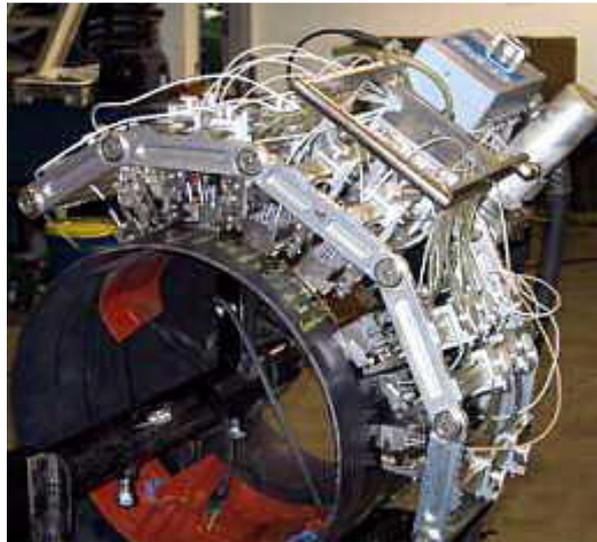


Figura III.21 – Sistema AUT

Por possibilitar uma varredura mais completa do cordão de solda (raiz e enchimento), a técnica automatizada divide a junta soldada em zonas. Em geral, cada zona possui uma faixa de 2 a 3mm e o sistema deve garantir a varredura de todas as zonas. Para isso, é necessária a utilização de diferentes cabeçotes focalizados, com diferentes ângulos nominais. Visando a varredura completa, também são usadas as técnicas pulso-eco (PE) e TANDEM (T), onde trabalha-se com dois transdutores, um para emissão (E) e outro para recepção (R). A figura III.22 apresenta uma ilustração da discriminação em zonas e a utilização de diferentes tipos de cabeçotes [26].

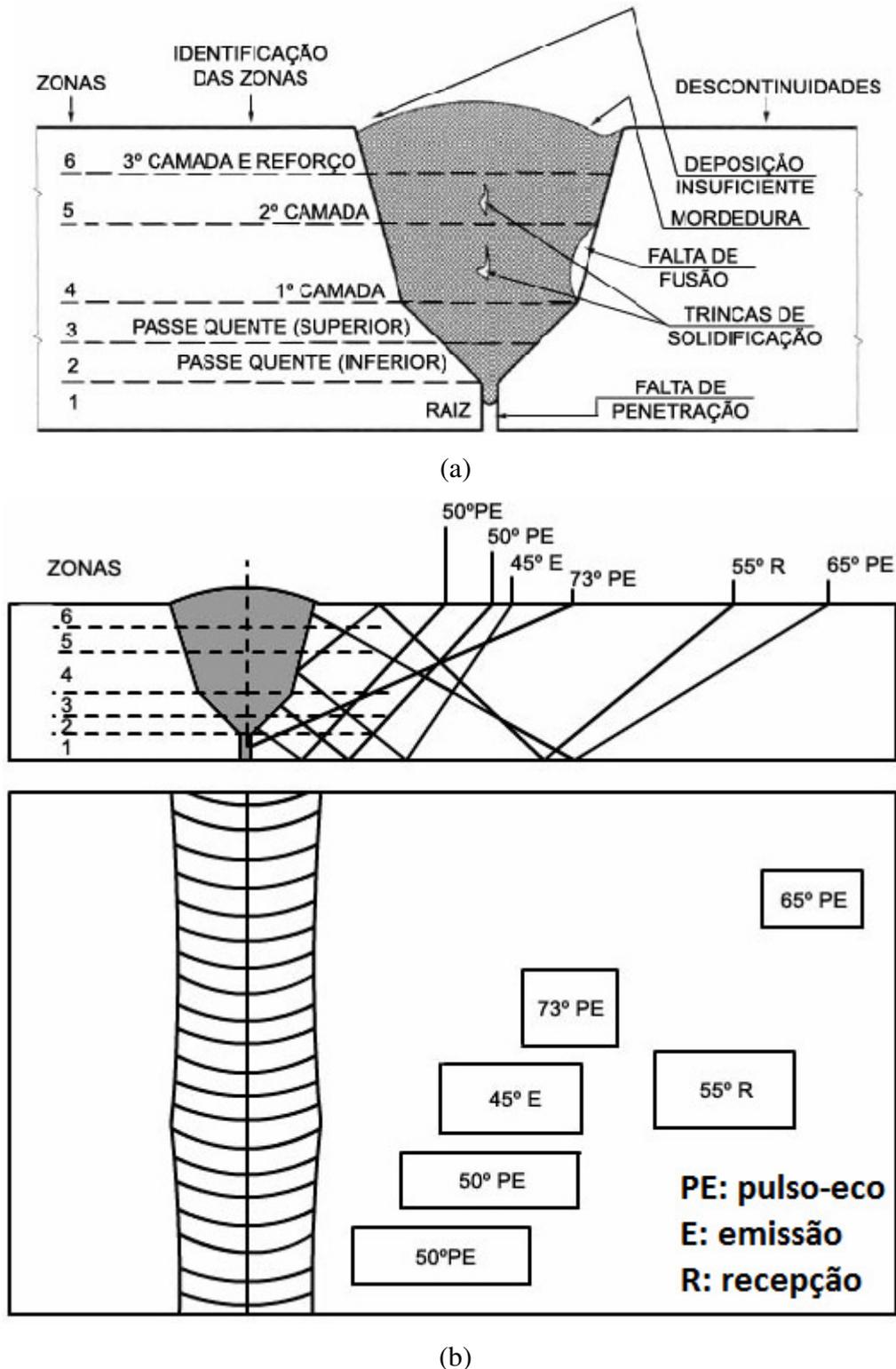


Figura III.22 – Discriminação de zonas: (a) zonas [26] e (b) cabeçotes [26]

A confiabilidade dos resultados obtidos em um ensaio AUT está intimamente ligada à repetibilidade da calibração do sistema. A calibração, realizada de maneira correta, utiliza 3 refletores de referência ao longo do perímetro do duto. Para cada refletor, 6 varreduras devem ser realizadas. Como esses sistemas podem ser aplicados

após a soldagem, as calibrações devem ser feitas a temperatura ambiente e a temperaturas mais elevadas [27].

Como a questão do ruído é de suma importância na confiabilidade de técnicas de END, pode se utilizar na calibração de refletores adicionais que resultem em sinais como menos de 40% de amplitude [27].

Planificando-se a varredura no duto é possível obter uma imagem que facilita a visualização dos defeitos detectados. Em geral, para sinais de defeitos que não apresentem um resultado muito claro da sua presença ou da sua dimensão, ensaios auxiliares são necessários (radiografia, ultrassom manual, líquido penetrante). A figura III.23 apresenta uma varredura planejada [27].

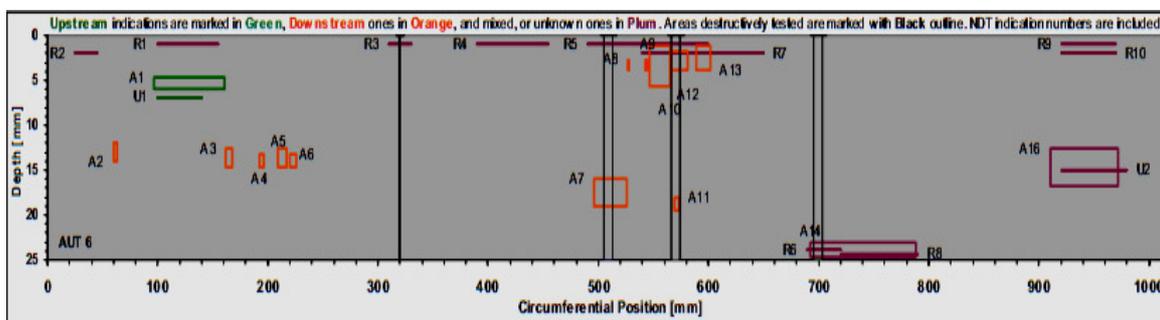


Figura III.23 – Varredura planejada do ensaio AUT [27]

A confiabilidade desse ensaio pode ser quantificada pela curva PoD. O tamanho de defeito que possui 90% de probabilidade de detecção com um intervalo de 95% de confiança é uma medida adotada para quantificar o ensaio e avaliar sua limitação. A altura do defeito, em geral, é a dimensão adotada para aplicação nas curvas PoD nesses tipos de sistema. Porém, sabe-se que a probabilidade de detecção é influenciada pelo comprimento, pois ele afeta diretamente a área do defeito, facilitando sua detecção [27].

A figura III.24 apresenta a curva PoD para o sistema AUT. Os pontos do gráfico indicam as discontinuidades inspecionadas com seu devido intervalo de confiança de 95% de certeza. A curva cheia verde é o ajuste da curva PoD com 79 observações no total. Por fim é possível observar a presença de uma curva fina verde delimitando o intervalo de confiança da curva PoD [27].

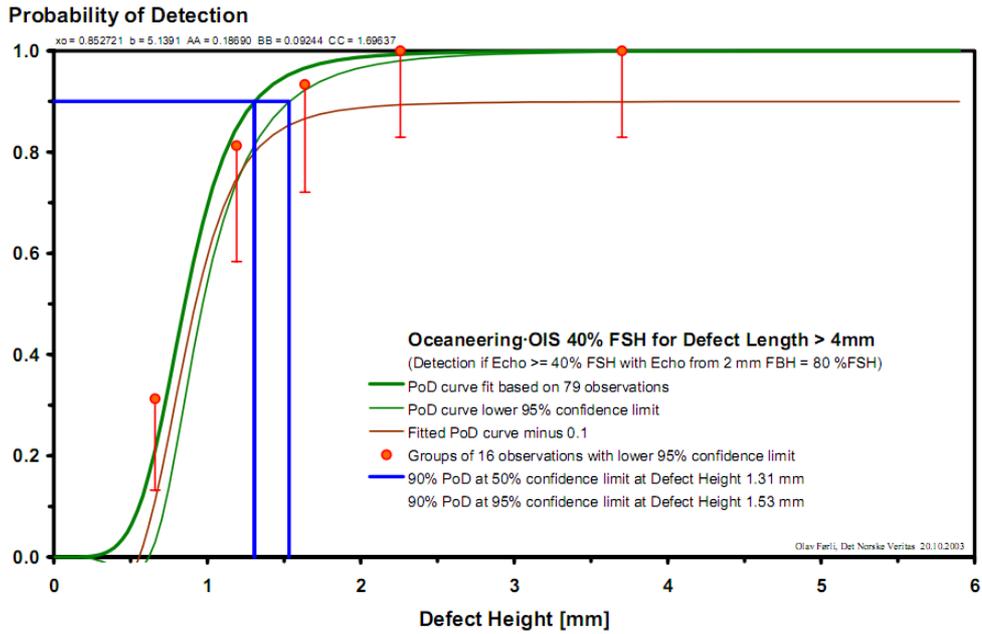


Figura III.24 – Curva PoD para o sistema AUT [27]

Como mencionado anteriormente nesse item, o comprimento tem um grande papel na detecção de descontinuidades. Aumentando o comprimento da descontinuidade, essa é mais facilmente detectável. Desta forma, é possível encontrar menores alturas com 90% de probabilidade de detecção quando o comprimento aumenta, como mostra a figura III.25. A figura apresenta essa relação para duas diferentes espessuras [27].

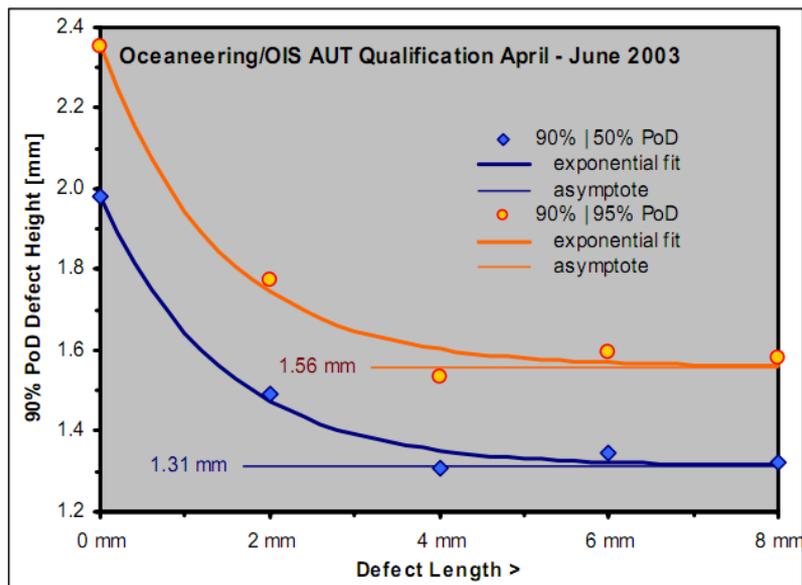


Figura III.25 – Variação da altura com 90% de PoD em função do comprimento [27]

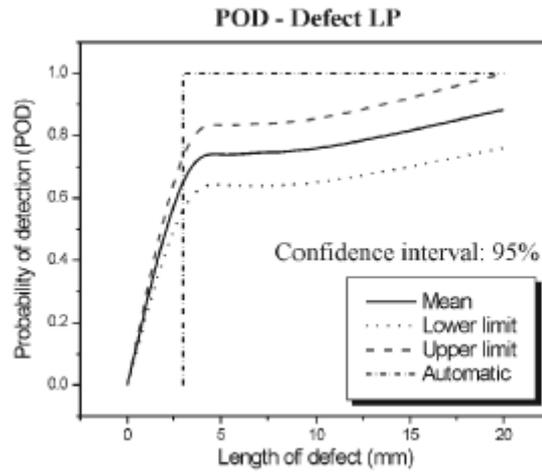
III.1.6.2 – Ultrassom Manual (UT)

Por utilizar um equipamento relativamente simples e leve, o ensaio ultrassônico manual acaba se tornando uma ferramenta comumente utilizada em campo para inspeções de manutenção. Logo, a confiabilidade de detecção de defeitos em soldas de tubos inspecionados por essa técnica também tem uma grande importância.

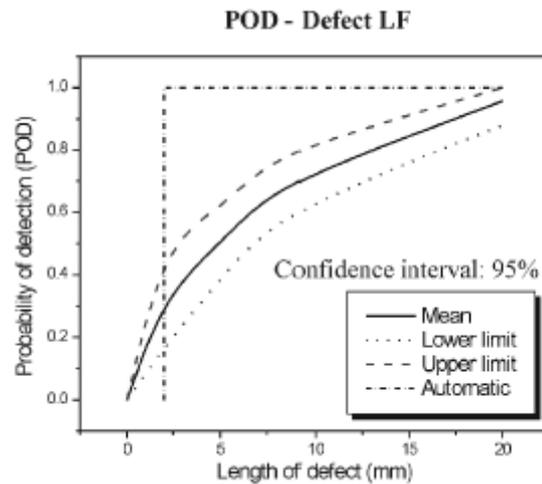
Desta forma, alguns trabalhos são realizados visando obter a confiabilidade deste ensaio através do procedimento experimental. Classes de defeitos de soldagem normalmente encontradas em soldas circunferenciais (falta de penetração e falta de fusão) foram selecionadas para análise. Foram intencionalmente inseridas em 24 cordões de solda pertencentes a 4 tubos de aço API 5L X70, com diâmetro externo de 254 mm e espessura de parede de 19,05 mm. Os defeitos foram inspecionados utilizando as técnicas ultrassônicas manual e automatizada. Essa última foi utilizada como comparação com os resultados obtidos da técnica manual [14].

As curvas PoD para os ensaios ultra-sônicos pulso-eco para as duas classes de defeitos foram desenvolvidas de acordo com os resultados dos ensaios experimentais de 5 inspetores. O comprimento do defeito foi a dimensão do defeito utilizada na metodologia. Cerca de 15 defeitos com comprimentos diferentes foram inseridos e suas alturas eram variadas. Como os dados dos 5 inspetores foram usados nas curvas PoD, essas foram desenvolvidas para cerca de 75 defeitos de comprimentos diferentes. Utilizando a técnica “bootstrap”, foi possível definir um intervalo de confiança para as curvas PoD tendo em vista que o número de defeitos era limitado, onde cada tamanho de defeito possuía 75 amostras. Através da técnica, cada grupo contendo 75 amostras para cada tamanho de defeito foi ampliada para se obter 1500 grupos contendo 75 amostras de cada. Os grupos gerados pela técnica “bootstrap” gera novos grupos através dos dados originais e seus parâmetros estatísticos [28].

Os resultados, além de gerar uma curva PoD, mostraram a superioridade da técnica automatizada em relação à técnica manual para os dois tipos de defeitos, com podemos ver na figura III.26 [28].



(a)



(b)

Figura III.26 – PoD para diferentes classes de defeitos:
 (a) falta de penetração [28] e (b) falta de fusão [28]

As curvas PoD da figura III.26 serviram para analisar a confiabilidade do ensaio. Além disso, elas serviram como ferramenta comparativa de variáveis, nesse caso, a técnica utilizada: manual e automatizada. Essa ferramenta comparativa através de curvas PoD também pode ser utilizada para comparações de tipos de defeito, como mostra a figura III.27 [28]

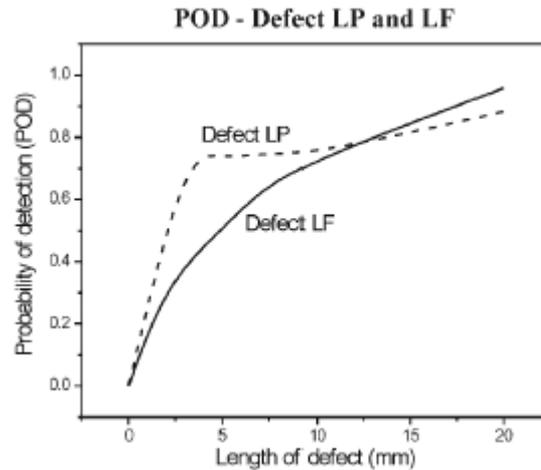


Figura III.27 – PoD comparativa entre tipos de defeitos [28]

Como visto nas figuras III.26 e III.27, a curva PoD se torna uma excelente ferramenta para avaliar a confiabilidade e comparar categorias. Dessa forma, é possível utilizar essas curvas para avaliar desempenho de inspetores diferentes. Para um outro tubo API 5L X70, foram inseridos defeitos de soldagem artificiais de três tipos diferentes: mordedura, falta de penetração e falta de fusão. O objetivo do estudo era determinar qual dos três operadores que inspecionaram o tubo apresenta o melhor desempenho [1].

Neste corpo de prova foram confeccionados 14 soldas circunferências com defeitos inseridos artificialmente por metodologia própria realizadas no momento da deposição dos cordões de solda. Os defeitos estão dispostos ao longo do cordão de solda e distanciados de 45°, totalizando 8 defeitos por junta soldada, como mostra a figura III.28 [1].

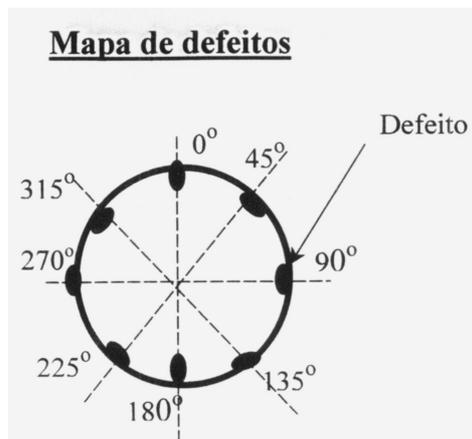


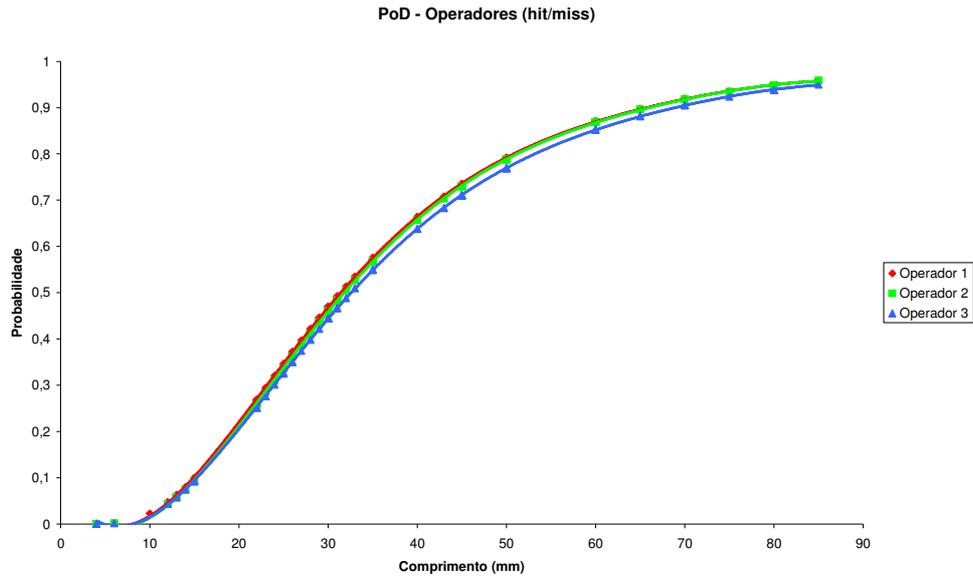
Figura III.28 – Mapa dos defeitos inseridos artificialmente [1]

Os diferentes tipos de defeitos foram dispostos ao longo das soldas no tubo de forma que para cada tipo de defeito existe um par de soldas com alturas diferentes. Além disso, foram realizadas duas soldas onde não há a presença de descontinuidades a fim de verificar a capacidade dos inspetores de discriminar um defeito de um sinal oriundo do ruído. A tabela III.4 apresenta a disposição dos tipos de defeitos ao longo das soldas [1].

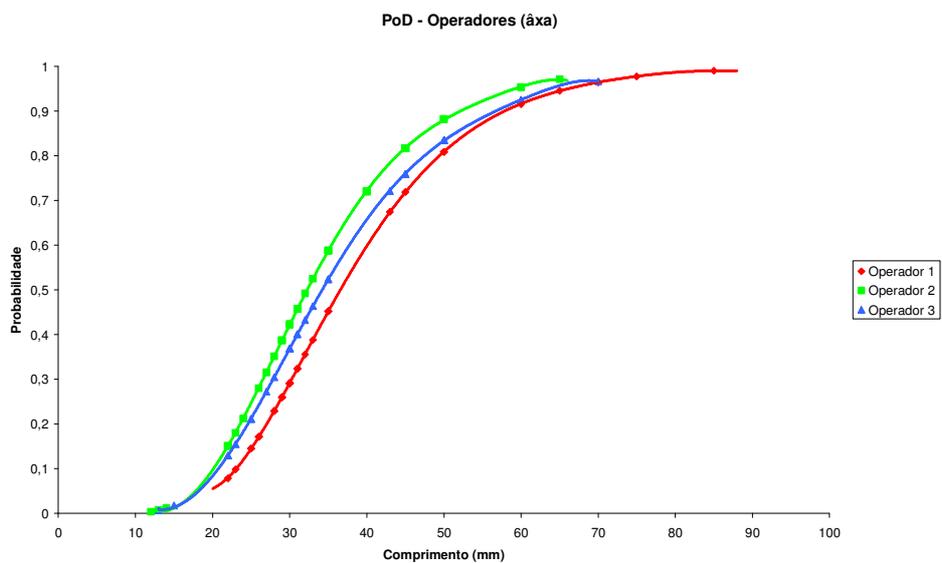
Tabela III.4 - Relação das soldas com os tipos de defeitos [1]

Solda	Tipo de defeito	Altura dos defeitos (mm)
1	Falta de Penetração	1 e 2
2	Falta de Penetração	4 e 8
3	Falta de Fusão	1 e 2
4	Falta de Fusão	4 e 8
5	Mordedura	1 e 2
6	Mordedura	4 e 8
7	Sem defeito	X
8	Falta de Penetração	1 e 2
9	Falta de Penetração	4 e 8
10	Falta de Fusão	1 e 2
11	Falta de Fusão	4 e 8
12	Mordedura	1 e 2
13	Mordedura	4 e 8
14	Sem defeito	X

Para o desenvolvimento das curvas PoD, foi utilizada a modelagem matemática, tanto para a análise *hit/miss* quanto para a análise \hat{a} versus a . Como não eram conhecidas as dimensões reais das descontinuidades, foi adotado como valor de a o valor da dimensão obtida do ensaio radiográfico. A análise \hat{a} versus a foi aplicada considerando 25% do dimensionamento do defeito. A figura III.29 apresenta as curvas PoD comparando os três operadores através das duas análises [1].



(a)



(b)

Figura III.29 – PoD comparando diferentes inspetores:

(a) *hit/miss* [1] e (b) *â versus a* [1]

III.1.7 – Softwares de PoD

A modelagem de curvas PoD já comprovou ser uma excelente maneira de se avaliar estatisticamente os dados obtidos de inspeções. Porém, uma necessidade da engenharia atual é obter resultados com praticidade e agilidade. Diversos *softwares* estão disponíveis no mercado para facilitar a modelagem dessas curvas. Dois desses

softwares vem se destacando devido aos seus resultados e praticidade: STATUS vr.2 e mh 1823.

III.1.7.1 – STATUS vr.2

O *software* STATUS (*Statistical Test Analysis Tools for Ultrasonic Systems*) vr.2 foi desenvolvido no Materials Research Institute de Waterloo, Canadá, pelo engenheiro Ed Ginzel. O STATUS vr.2 tem sido uma grande ferramenta para o desenvolvimento de curvas PoD e análises de dimensionamento de descontinuidades. A modelagem utilizada pelo *software* é a distribuição log-normal.

Por se tratar de uma planilha elaborada do Microsoft Excel®, a interface do programa se torna bem simples para o usuário. Essa interface pode ser observada na figura III.30.

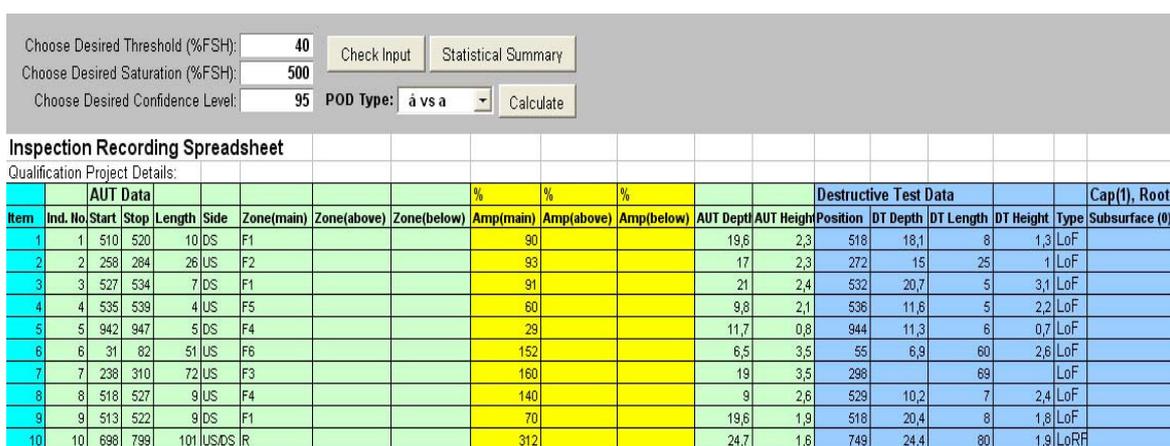


Figura III.30 – Interface do STATUS vr.2 [29]

A dimensão que o *software* utiliza para o desenvolvimento das curvas PoD e análises de dimensionamento é a altura do defeito. Porém, o STATUS vr.2 também serve como um excelente registro do banco de dados, como mostrou a figura III.30. É possível registrar informações referentes a outras dimensões da descontinuidade, como comprimento e profundidade. Informações tais como localização longitudinal e transversal também podem ser registradas [29].

O STATUS vr.2 permite o usuário escolher o tipo de análise que deseja utilizar, porém seu diferencial acaba sendo na análise *â versus a*. Mesmo assim, caso o usuário deseje analisar o banco de dados de maneira binária, não há qualquer restrição. A figura III.31 ilustra uma curva PoD desenvolvida pelo *software* para a análise *hit/miss* [29].

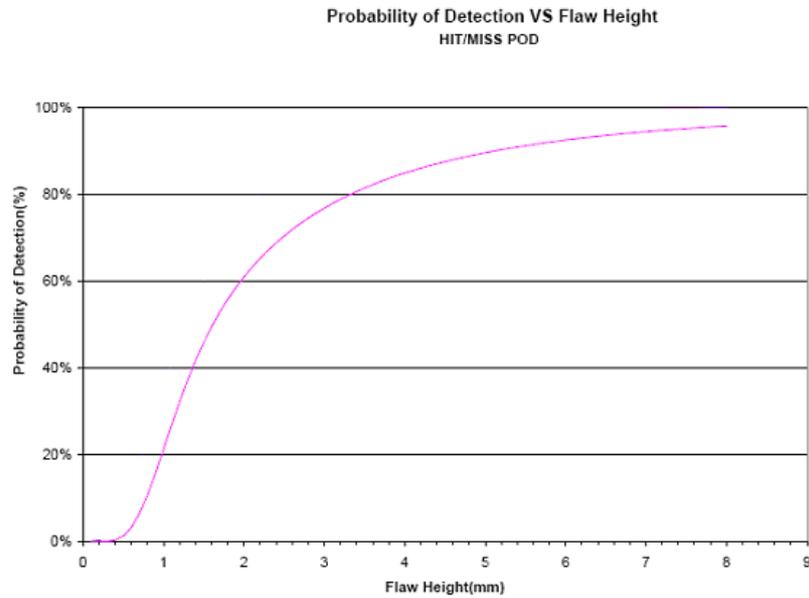


Figura III.31 – Curva PoD do *software* STATUS vr.2 para análise *hit/miss* [29]

Para a análise \hat{a} versus a , o STATUS vr.2 necessita do valor da amplitude medida pelo inspetor. Definindo o limiar inferior, todos os dados abaixo do limiar serão considerados como ruídos e não descontinuidades. Através dos dados referentes aos valores reais e medidos, o *software* permite desenvolver a curva PoD, analisar linearmente as dimensões reais e medidas e disponibiliza a distribuição do erro do dimensionamento. As figuras III.32 e III.33 apresentam um exemplo de curva PoD desenvolvida por essa análise e a relação entre as dimensões [29].

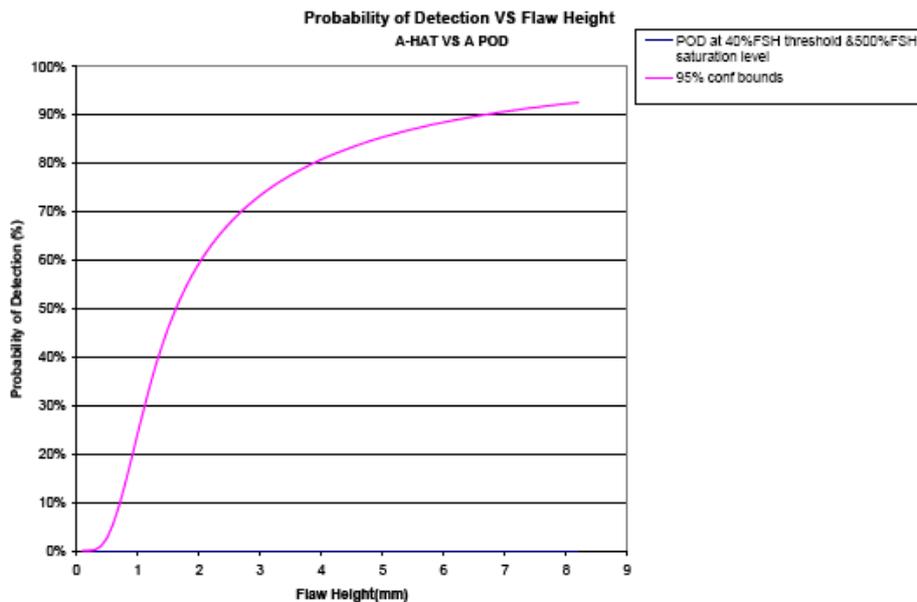


Figura III.32 – Curva PoD do *software* STATUS vr.2 para análise \hat{a} versus a [29]

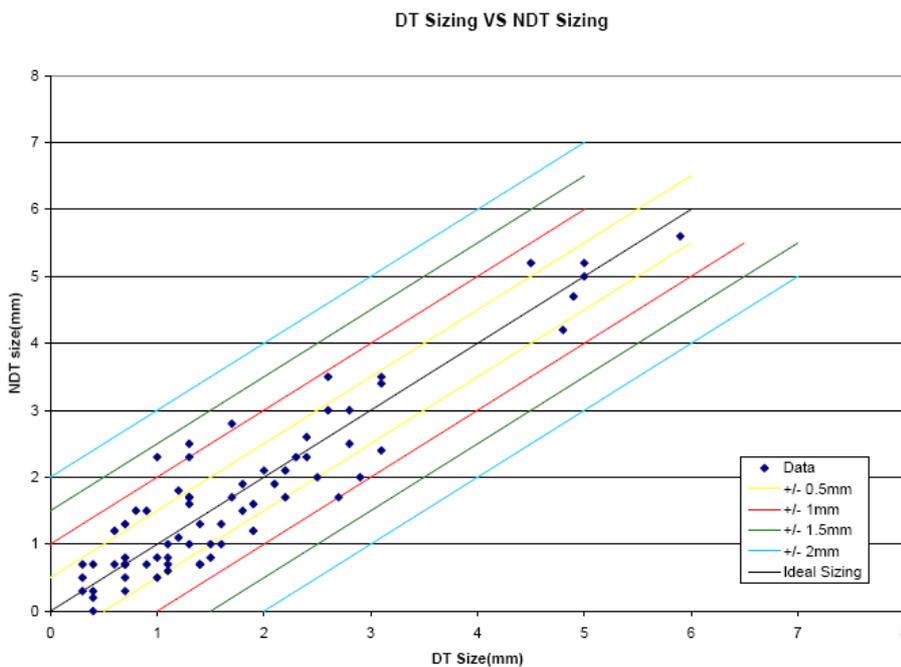


Figura III.33 – Relação linear das dimensões reais e medidas: STATUS vr.2 [29]

III.1.7.2 – mh 1823

O *software* MIL-HDBK-1823 (mh 1823) é um pacote desenvolvido pelo engenheiro Charles Annis que utiliza a linguagem R, utilizada pela computação estatística e gráfica. Esse tipo de linguagem fornece uma ampla variedade de ferramentas estatísticas (modelagens lineares e não-lineares, testes estatísticos clássicos,

análise de séries temporais, classificação, agrupamento, etc.) e técnicas gráficas, sendo altamente extensível [30].

Um dos pontos fortes da linguagem R é a facilidade com que resultados bem detalhados e de qualidade são produzidos, incluindo os símbolos matemáticos e equações, quando necessário. Em resumo, a linguagem R é uma ferramenta para utilizar softwares de bases estatísticas, que necessitam de uma leitura de um conjunto de dados e que fornece como resposta uma análise estatística definida pelo usuário [30].

Através do mh 1823, é possível planejar um ensaio não-destrutivo, projetar e fabricar corpos de prova para demonstração de confiabilidade, adquirir com desempenho um sistema de dados e fornece métodos estatísticos para analisar os dados e produzir curvas PoD. Além disso, é possível estabelecer limites de confiança de 95% e analisar ruídos. O software trabalha com as duas análises de dados no desenvolvimento das curvas PoD: *hit/miss* e *â versus a*. A figura III.34 apresenta a interface do mh 1823 [30].

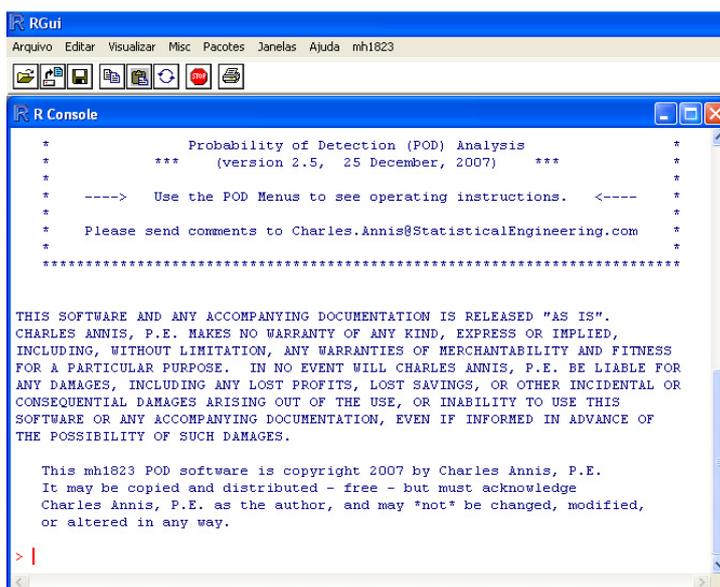


Figura III.34 – Interface do mh 1823 [30]

O *software* mh1823 é livre e pode ser obtido no site www.statisticalengineering.com. Ele necessita de uma planilha de dados para leitura, que pode ser um arquivo originado no *software* Microsoft Excel[®]. Para cada análise de dados (*hit/miss* e *â versus a*), há um procedimento específico para elaboração da tabela, como podemos observar nas tabelas III.5 e III.6 [30].

Tabela III.5 – Dados para o *software* mh1823: análise *hit/miss* [30]

ID	length.inch	hit.miss
1	0,21	1
2	0,095	0
3	0,195	1
4	0,095	1
5	0,207	1
6	0,102	0
7	0,141	1
8	0,115	0
9	0,08	0
10	0,019	0

Tabela III.6 – Dados para o *software* mh1823: análise \hat{a} versus a [30]

ID	size	\hat{a}
1	6	192
2	6	166
3	7	137
4	7	97
5	7	147
6	8	221
7	8	148
8	8	152
9	9	376
10	9	568

Após a leitura de dados, o usuário pode ter como resultado o desenvolvimento de curvas PoD através da modelagem log-normal e uma análise do dimensionamento pela relação linear entre valor real e medido. As figuras III.35 e III.36 referem-se à curva PoD e à análise de dimensionamento, respectivamente [30].

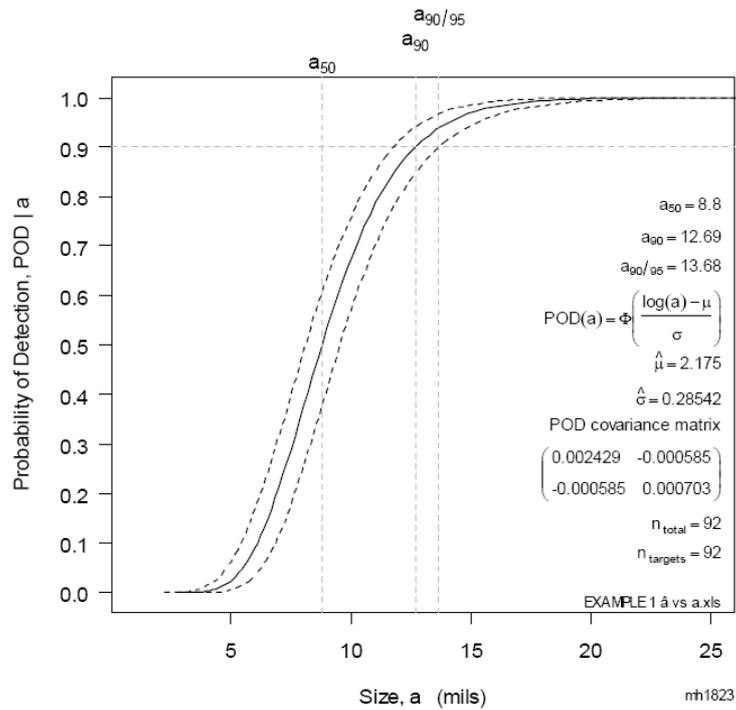


Figura III.35 – Curva PoD do *software* mh 1823 [30]

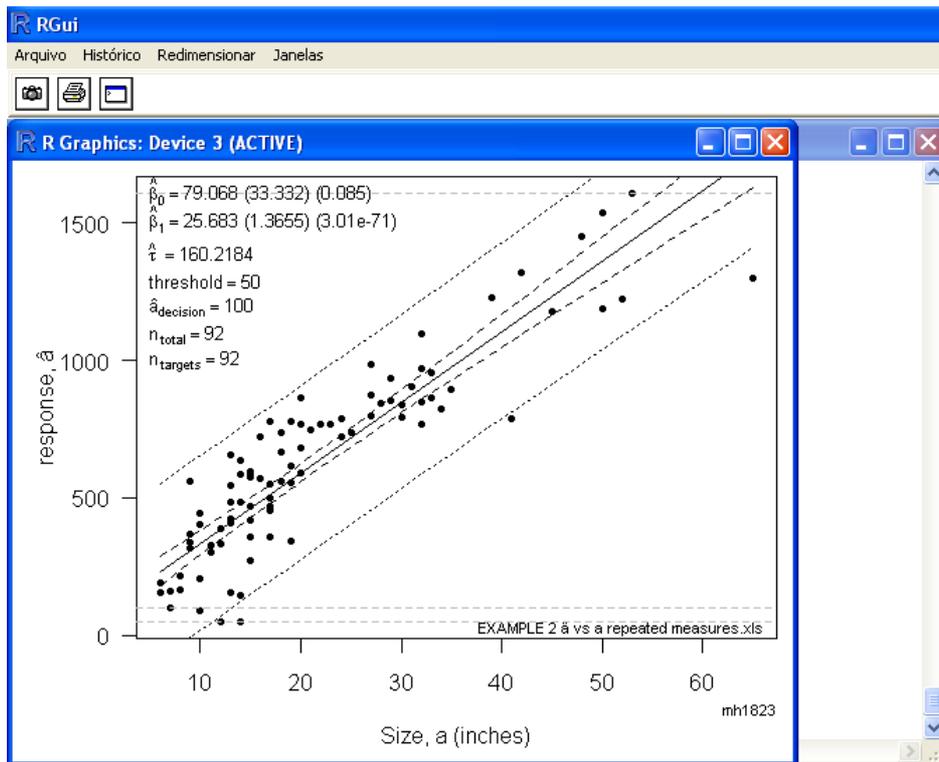


Figura III.36 - Relação linear das dimensões reais e medidas: mh 1823 [30]

Na figura III.35 é possível observar que junto à curva PoD o *software* apresenta todos os parâmetros estatísticos utilizados na modelagem. Além da média e do desvio

padrão, é apresentada a curva referente à distribuição lognormal. Os tamanhos referentes a PoD de 50% e 90% também são fornecidos, além do valor referente a 90% de PoD com 95% de confiança. Por fim, ele reporta o número total da amostras e quantas detecções foram realizadas [30].

III.1.8 – Intervalos de Confiança e Estatística

Intervalo de confiança (IC) pode ser definido como um intervalo estimado de um parâmetro estatístico, isto é, ao invés de estimar o parâmetro por um único valor, temos um intervalo de prováveis estimativas. A maneira de avaliar o quanto essas estimativas são prováveis é dada pelo nível de significância. Com isso, quanto maior a probabilidade do intervalo conter o parâmetro, maior será o seu intervalo de confiança [19].

A finalidade dos intervalos de confiança nada mais é do que indicar a confiabilidade de uma estimativa. No caso de curvas PoD, para cada descontinuidade, teremos um valor para sua probabilidade de detecção, mas não podemos afirmar que esse valor é absoluto. Para determinar qual seria o valor desejado, devemos levar em consideração o risco que estamos assumindo para obtermos um intervalo possível onde a PoD se localiza. Quanto menor o risco do valor da probabilidade de detecção se encontrar fora do intervalo de confiança, mais estreito será este intervalo [19-20].

Quando se trabalha com a confiabilidade de ensaios não destrutivos através de curvas PoD, é comum procurar saber qual é o tamanho da descontinuidade que possui 90% de probabilidade de detecção com um intervalo de confiança de 95%. Utiliza-se essa metodologia para definir qual tamanho de defeito que a técnica utilizada garante detectar com alta confiabilidade. Para um intervalo de confiança de 95%, temos que o grau de risco (grau de significância) é de 5%.

Podemos observar na figura III.37 uma curva PoD com o intervalo de confiança de 95%. Para esse caso, podemos afirmar que, para cada dimensão de descontinuidade, sua probabilidade de detecção está localizada entre os intervalos superior e inferior [2].

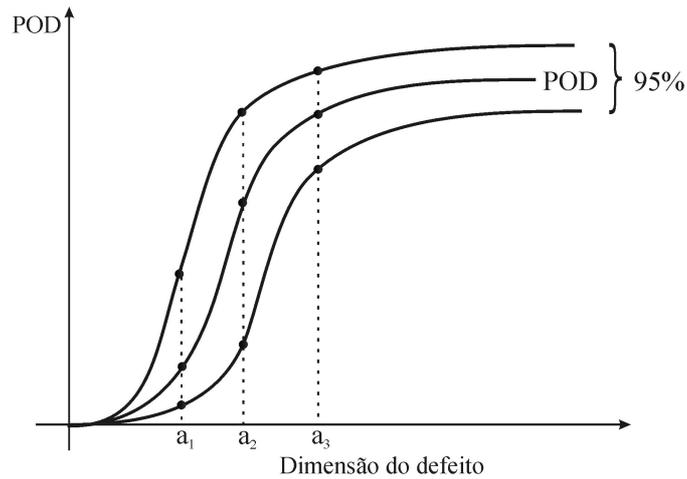
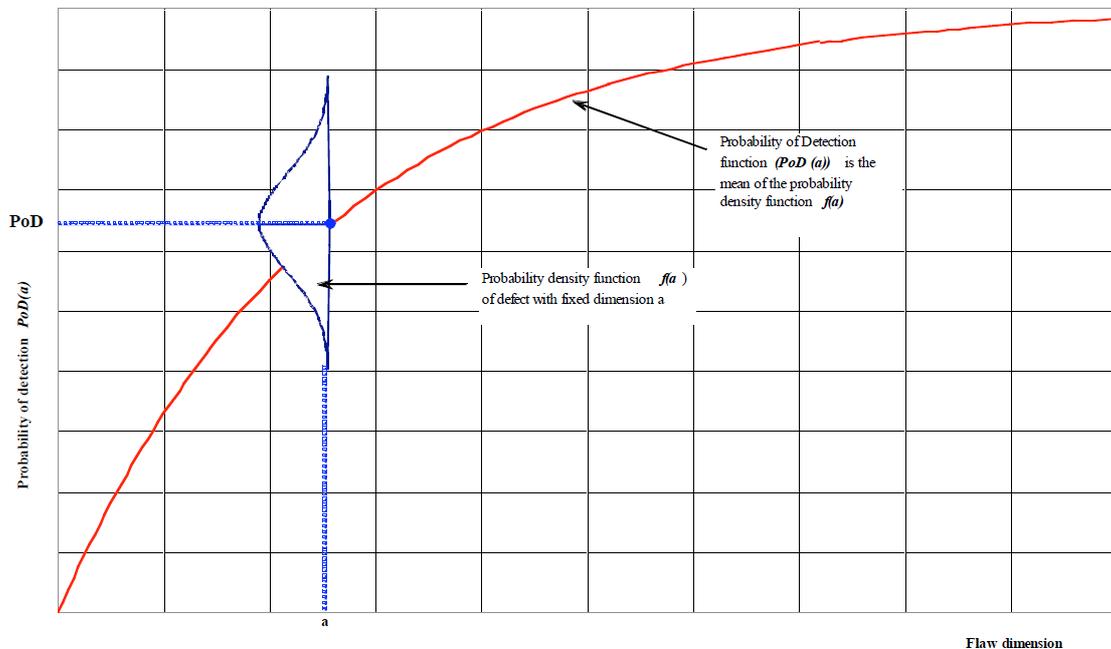
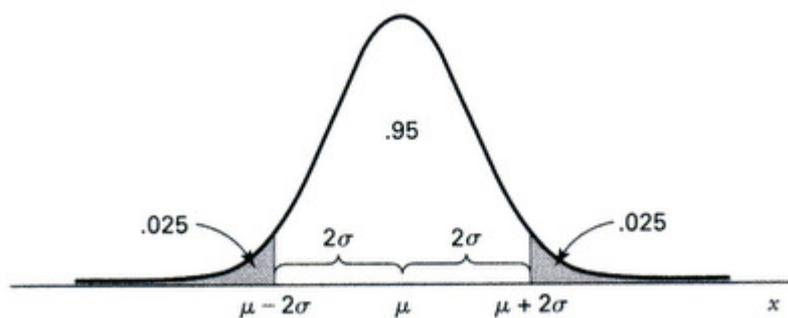


Figura III.37 – Curva PoD com intervalo de confiança de 95% [2]

Analisando a figura III.37, podemos fazer uma observação mais detalhada pontualmente. Trabalhando com um intervalo de confiança de 95%, para uma descontinuidade de dimensão a , sua probabilidade de detecção deve ser descrita pela função de densidade de probabilidade, como mostra a figura III.38. Para o intervalo escolhido, assumimos um risco de 5%, onde 2,5% será o risco de um subdimensionamento e o restante de sobredimensionamento.



(a)



(b)

Figura III.38 – Função de densidade de probabilidade:

(a) na curva PoD [3] e (b) 5% de significância [20]

Fora o intervalo de confiança, outras análises estatísticas são relevantes quando se quer conhecer a confiabilidade de um ensaio não destrutivo. Sabe-se que a modelagem matemática da curva PoD é o melhor ajuste para os pontos de proporção de detecção de um banco de dados. Através da equação III.2 é possível calcular a proporção de detecção de uma descontinuidade. Aplicando esse cálculo para todas as descontinuidades do banco de dados, podemos obter graficamente a relação entre a dimensão de uma descontinuidade e sua proporção de detecção.

A curva PoD interpola esse pontos, podendo proporcionar o conhecimento de probabilidade de detecção de uma descontinuidade que se quer não pertencia ao banco de dados, através de extrapolação. Porém, caso for desejado saber se a curva obtida realmente interpola os pontos experimentais levando em consideração os pontos individuais, é necessária uma nova abordagem.

O documento “NT TECHN REPORT 394” nos fornece uma maneira de calcular os intervalos de confiança unilateral inferior ponto a ponto, em função do número de inspeções e quantas detecções ocorreram. Esse intervalo segue a distribuição de Bernoulli e pode ser obtido através da tabela III.7 e da equação III.9. O intervalo segundo a distribuição de Bernoulli é aplicada quando o banco de dados existente se encontra na forma binária apresentada pela análise *hit/miss* [12].

Tabela III.7 – Intervalo de confiança pela distribuição de Bernoulli [12]

N: Number of observations (defects)		D: Number of sucesses (detected defects)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
N/D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	26	28	D	N																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
1	0.050																										1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
2	0.025	0.224																										2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
3	0.017	0.135	0.388																									3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
4	0.013	0.098	0.246	0.473																								4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
5	0.010	0.076	0.189	0.343	0.549																							5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
6	0.009	0.063	0.153	0.271	0.418	0.607																						6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
7	0.007	0.053	0.129	0.225	0.341	0.479	0.652																					7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
8	0.006	0.046	0.111	0.193	0.289	0.400	0.528	0.688																				8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
9	0.006	0.041	0.098	0.169	0.251	0.345	0.450	0.571	0.717																			9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
10	0.005	0.037	0.087	0.150	0.222	0.304	0.393	0.493	0.606	0.741																		10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
11	0.005	0.033	0.079	0.135	0.200	0.271	0.350	0.438	0.530	0.636	0.762																	11																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
12	0.004	0.030	0.072	0.123	0.181	0.245	0.315	0.391	0.473	0.562	0.661	0.779																12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
13	0.004	0.028	0.066	0.113	0.166	0.224	0.287	0.355	0.427	0.505	0.590	0.694	0.794															13																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
14	0.004	0.026	0.061	0.104	0.153	0.208	0.264	0.325	0.390	0.460	0.534	0.615	0.703	0.807														14																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
15	0.003	0.024	0.057	0.097	0.142	0.191	0.244	0.300	0.360	0.423	0.489	0.560	0.637	0.721	0.819													15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
16	0.003	0.023	0.053	0.090	0.132	0.178	0.227	0.279	0.333	0.391	0.452	0.516	0.583	0.656	0.736	0.829												16																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
17	0.003	0.021	0.050	0.085	0.124	0.166	0.212	0.260	0.311	0.364	0.420	0.478	0.539	0.604	0.674	0.750	0.838											17																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
18	0.003	0.024	0.057	0.097	0.142	0.191	0.244	0.300	0.360	0.423	0.489	0.562	0.646	0.736	0.833	0.930	1.027	1.124	1.221	1.318	1.415	1.512	1.609	1.706	1.803	1.900	1.997	2.094	2.191	2.288	2.385	2.482	2.579	2.676	2.773	2.870	2.967	3.064	3.161	3.258	3.355	3.452	3.549	3.646	3.743	3.840	3.937	4.034	4.131	4.228	4.325	4.422	4.519	4.616	4.713	4.810	4.907	5.004	5.101	5.198	5.295	5.392	5.489	5.586	5.683	5.780	5.877	5.974	6.071	6.168	6.265	6.362	6.459	6.556	6.653	6.750	6.847	6.944	7.041	7.138	7.235	7.332	7.429	7.526	7.623	7.720	7.817	7.914	8.011	8.108	8.205	8.302	8.399	8.496	8.593	8.690	8.787	8.884	8.981	9.078	9.175	9.272	9.369	9.466	9.563	9.660	9.757	9.854	9.951	10.048	10.145	10.242	10.339	10.436	10.533	10.630	10.727	10.824	10.921	11.018	11.115	11.212	11.309	11.406	11.503	11.600	11.697	11.794	11.891	11.988	12.085	12.182	12.279	12.376	12.473	12.570	12.667	12.764	12.861	12.958	13.055	13.152	13.249	13.346	13.443	13.540	13.637	13.734	13.831	13.928	14.025	14.122	14.219	14.316	14.413	14.510	14.607	14.704	14.801	14.898	14.995	15.092	15.189	15.286	15.383	15.480	15.577	15.674	15.771	15.868	15.965	16.062	16.159	16.256	16.353	16.450	16.547	16.644	16.741	16.838	16.935	17.032	17.129	17.226	17.323	17.420	17.517	17.614	17.711	17.808	17.905	18.002	18.099	18.196	18.293	18.390	18.487	18.584	18.681	18.778	18.875	18.972	19.069	19.166	19.263	19.360	19.457	19.554	19.651	19.748	19.845	19.942	20.039	20.136	20.233	20.330	20.427	20.524	20.621	20.718	20.815	20.912	21.009	21.106	21.203	21.300	21.397	21.494	21.591	21.688	21.785	21.882	21.979	22.076	22.173	22.270	22.367	22.464	22.561	22.658	22.755	22.852	22.949	23.046	23.143	23.240	23.337	23.434	23.531	23.628	23.725	23.822	23.919	24.016	24.113	24.210	24.307	24.404	24.501	24.598	24.695	24.792	24.889	24.986	25.083	25.180	25.277	25.374	25.471	25.568	25.665	25.762	25.859	25.956	26.053	26.150	26.247	26.344	26.441	26.538	26.635	26.732	26.829	26.926	27.023	27.120	27.217	27.314	27.411	27.508	27.605	27.702	27.799	27.896	27.993	28.090	28.187	28.284	28.381	28.478	28.575	28.672	28.769	28.866	28.963	29.060	29.157	29.254	29.351	29.448	29.545	29.642	29.739	29.836	29.933	30.030	30.127	30.224	30.321	30.418	30.515	30.612	30.709	30.806	30.903	31.000	31.097	31.194	31.291	31.388	31.485	31.582	31.679	31.776	31.873	31.970	32.067	32.164	32.261	32.358	32.455	32.552	32.649	32.746	32.843	32.940	33.037	33.134	33.231	33.328	33.425	33.522	33.619	33.716	33.813	33.910	34.007	34.104	34.201	34.298	34.395	34.492	34.589	34.686	34.783	34.880	34.977	35.074	35.171	35.268	35.365	35.462	35.559	35.656	35.753	35.850	35.947	36.044	36.141	36.238	36.335	36.432	36.529	36.626	36.723	36.820	36.917	37.014	37.111	37.208	37.305	37.402	37.499	37.596	37.693	37.790	37.887	37.984	38.081	38.178	38.275	38.372	38.469	38.566	38.663	38.760	38.857	38.954	39.051	39.148	39.245	39.342	39.439	39.536	39.633	39.730	39.827	39.924	40.021	40.118	40.215	40.312	40.409	40.506	40.603	40.700	40.797	40.894	40.991	41.088	41.185	41.282	41.379	41.476	41.573	41.670	41.767	41.864	41.961	42.058	42.155	42.252	42.349	42.446	42.543	42.640	42.737	42.834	42.931	43.028	43.125	43.222	43.319	43.416	43.513	43.610	43.707	43.804	43.901	44.000	44.097	44.194	44.291	44.388	44.485	44.582	44.679	44.776	44.873	44.970	45.067	45.164	45.261	45.358	45.455	45.552	45.649	45.746	45.843	45.940	46.037	46.134	46.231	46.328	46.425	46.522	46.619	46.716	46.813	46.910	47.007	47.104	47.201	47.298	47.395	47.492	47.589	47.686	47.783	47.880	47.977	48.074	48.171	48.268	48.365	48.462	48.559	48.656	48.753	48.850	48.947	49.044	49.141	49.238	49.335	49.432	49.529	49.626	49.723	49.820	49.917	50.014	50.111	50.208	50.305	50.402	50.500	50.597	50.694	50.791	50.888	50.985	51.082	51.179	51.276	51.373	51.470	51.567	51.664	51.761	51.858	51.955	52.052	52.149	52.246	52.343	52.440	52.537	52.634	52.731	52.828	52.925	53.022	53.119	53.216	53.313	53.410	53.507	53.604	53.701	53.798	53.895	53.992	54.089	54.186	54.283	54.380	54.477	54.574	54.671	54.768	54.865	54.962	55.059	55.156	55.253	55.350	55.447	55.544	55.641	55.738	55.835	55.932	56.029	56.126	56.223	56.320	56.417	56.514	56.611	56.708	56.805	56.902	57.000	57.097	57.194	57.291	57.388	57.485	57.582	57.679	57.776	57.873	57.970	58.067	58.164	58.261	58.358	58.455	58.552	58.649	58.746	58.843	58.940	59.037	59.134	59.231	59.328	59.425	59.522	59.619	59.716	59.813	59.910	60.007	60.104	60.201	60.298	60.395	60.492	60.589	60.686	60.783	60.880	60.977	61.074	61.171	61.268	61.365	61.462	61.559	61.656	61.753	61.850	61.947	62.044	62.141	62.238	62.335	62.432	62.529	62.626	62.723	62.820	62.917	63.014	63.111	63.208	63.305	63.402	63.500	63.597	63.694	63.791	63.888	63.985	64.082	64.179	64.276	64.373	64.470	64.567	64.664	64.761	64.858	64.955	65.052	65.149	65.246	65.343	65.440	65.537	65.634	65.731	65.828	65.925	66.022	66.119	66.216	66.313	66.410	66.507	66.604	66.701	66.798	66.895	66.992	67.089	67.186	67.283	67.380	67.477	67.574	67.671	67.768	67.865	67.962	68.059	68.156	68.253	68.350	68.447	68.544	68.641	68.738	68.835	68.932	69.029	69.126	69.223	69.320	69.417	69.514	69.611	69.708	69.805	69.902	70.000	70.097	70.194	70.291	70.388	70.485	70.582	70.679	70.776	70.873	70.970	71.067	71.164	71.261	71.358	71.455	71.552	71.649	71.746	71.843	71.940	72.037	72.134	72.231	72.328	72.425	72.522	72.619	72.716	72.813	72.910	73.007	73.104	73.201	73.298	73.395	73.492	73.589	73.686	73.783	73.880	73.977	74.074	74.171	74.268	74.365	74.462	74.559	74.656	74.753	74.850	74.947	75.044	75.141	75.238	75.335	75.432	75.529	75.626	75.723	75.820	75.917	76.014	76.111	76.208	76.305	76.402	76.500	76.597	76.694	76.791	76.888	76.985	77.082	77.179	77.276	77.373	77.470	77.567	77.664	77.761	77.858	77.955	78.052	78.149	78.246	78.343	78.440	78.537	78.634	78.731	78.828	78.925	79.022	79.119	79.216	79.313	79.410

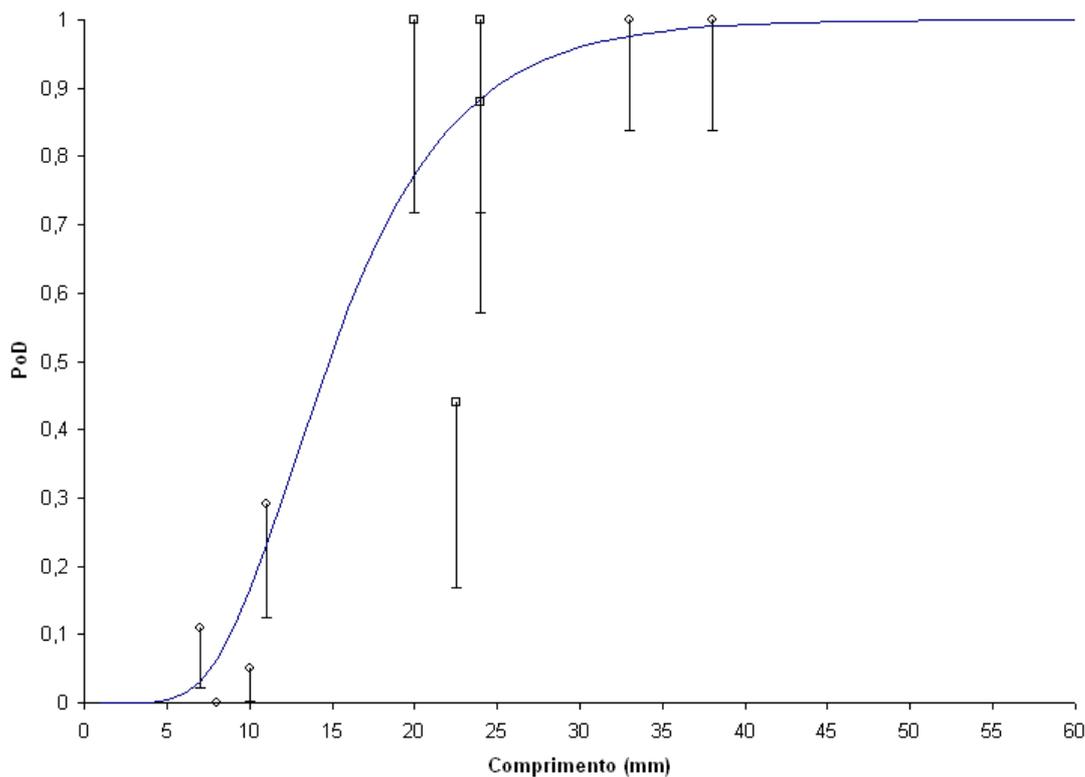


Figura III.39 – Intervalos de confiança unilaterais inferiores para proporções de detecção

Na realização de ensaios não destrutivos visando obter dados para avaliação de confiabilidade, inúmeras conseqüências podem tornar esse procedimento muito complicado. Essas conseqüências são:

- ✓ Custo elevado para produção dos defeitos artificiais;
- ✓ Custo elevado de diária de inspetores;
- ✓ Longo tempo de inspeção;
- ✓ Dificuldades no desenvolvimento da curva PoD.

Quando as exigências para o desenvolvimento de curvas PoD de maneira experimental não podem ser cumpridas, geralmente devido a um número de defeitos ser limitado, é possível contornar o problema aplicando a técnica *bootstrap* [2].

A técnica *bootstrap* é aplicada para a resolução de problemas de difícil aplicação da análise estatística tradicional. Em outras palavras, o que técnica *bootstrap* tenta realizar seria o desejável na prática, se fosse possível: repetir a experiência [13].

Nesse tipo de abordagem, as observações são escolhidas de forma aleatória e as estimativas são recalculadas [13].

Mesmo que uma amostra X disponível não seja a desejada, deve-se iniciar a metodologia aproveitando o conjunto que se dispõe. Desta maneira, consideramos a amostra disponível como se esta representasse toda a população, denominado de N , como mostra a equação III.10, onde X_1, \dots, X_n são amostras obtidas da população [13].

$$X = (X_1, \dots, X_n)$$

Equação III.10 [13]

A partir de uma amostra, é possível gerar um novo conjunto de dados utilizando os parâmetros estatísticos dessa amostra inicial. Repetindo essa metodologia, iremos obter como resultado uma amostra final com o número muito mais elevado que a amostra original. A figura III.40 apresenta um esquema do procedimento da técnica *bootstrap* que pode ser dividido nos seguintes passos [13]:

- ✓ Passos 0: realização de ensaio experimental visando obter o conjunto de dados inicial;
- ✓ Passo 1: utilizar um gerador de números aleatórios para selecionar n amostras a partir do conjunto inicial;
- ✓ Passo 2: obter a estimativa de *bootstrap*
- ✓ Passo 3: repetir os passos 1 e 2 para um número elevado de vezes para obter as estimativas;
- ✓ Passo 4: aproximação da distribuição;
- ✓ Passo 5: determinar os intervalos de confiança.

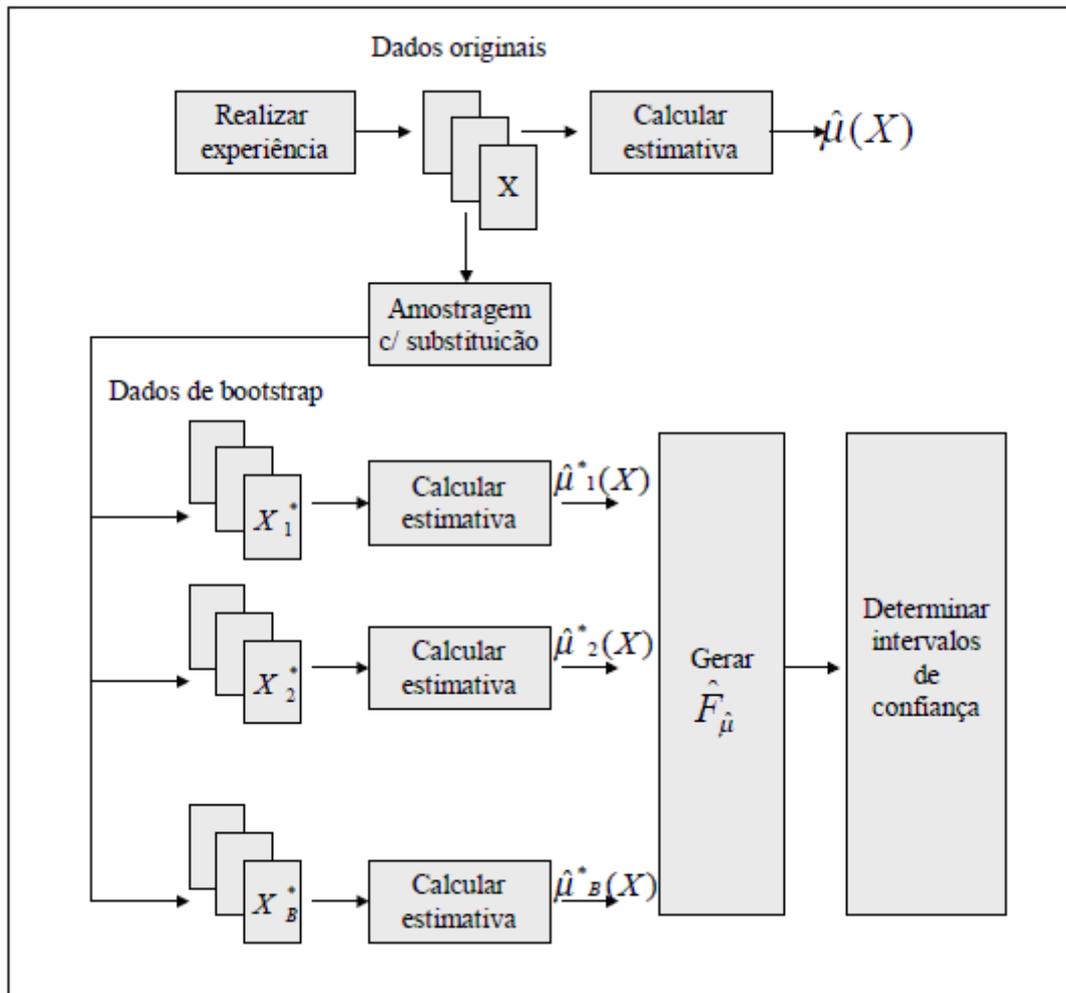


Figura III.40 – Técnica *bootstrap* [13]

Outra análise estatística muito importante para quem utiliza uma técnica de END e relaciona o dimensionamento da inspeção com a mecânica da fratura é o erro do dimensionamento. Conhecer o erro do dimensionamento da técnica permite reduzir ou aumentar o tamanho medido para que se aproxime do real, podendo aplicar a mecânica da fratura para a situação real.

A diferença entre os valores reais e medidos permite analisar a frequência dos erros de dimensionamento obtidos. Para isso, os erros são divididos em grupos, onde cada grupo é uma medida de erro diferente. São observadas quantas vezes ocorreram erros de um mesmo grupo, criando-se, assim, um boletim de frequências. Com todas as diferenças das medidas a entre \hat{a} também são calculados o desvio padrão e a média. A figura III.41 apresenta o exemplo do documento DNV Report 2003-3381 para a distribuição da frequência dos erros [27].

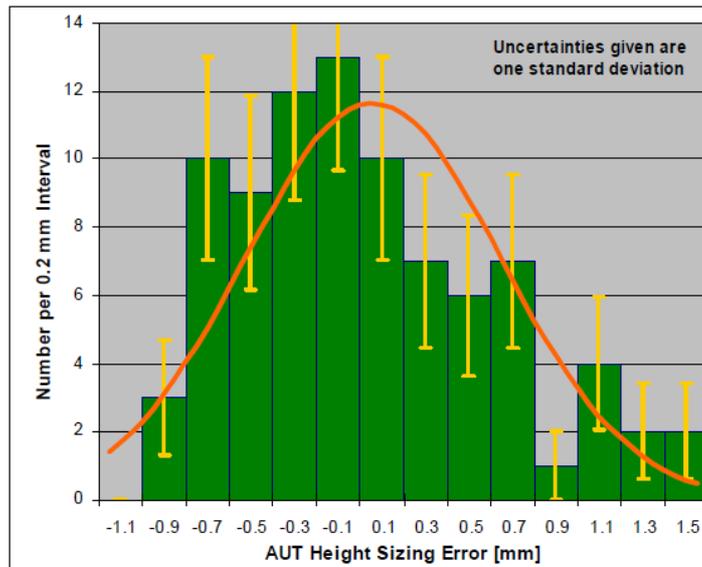


Figura III.41 – Distribuição da frequência dos erros de dimensionamento [27]

Em geral, a tolerância mandatória para o risco admissível no erro do dimensionamento deve ser menor ou igual a 5%. Como foi visto na figura III.38, pela estatística, um intervalo com 95% de certeza é definido por pela região contida entre as duas equações:

$$\text{Sobredimensionamento} = (1,96 \times \sigma) + \mu \quad \text{Equação III.11}$$

$$\text{Subdimensionamento} = (1,96 \times \sigma) - \mu \quad \text{Equação III.12}$$

Desta forma, o valor máximo admissível para um erro de subdimensionamento é dado através da equação III.12. Com esse valor, é possível criar uma reta no gráfico $a \times \hat{a}$ que define o limite aceitável, como mostra a figura III.42.

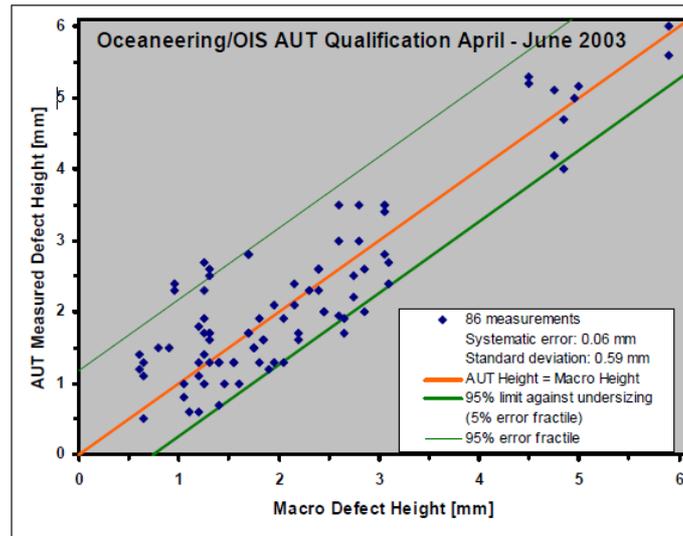


Figura III.42 – Limite aceitável de subdimensionamento [27]

Caso uma técnica subdimensione as descontinuidades com o erro de 1mm, para um valor medido de 5mm, na verdade implica que a descontinuidade possui 6mm. Desta maneira, é possível aplicar a mecânica da fratura com a dimensão real da descontinuidade através do valor medido e do erro de dimensionamento.

III.1.9 – Probabilidade de Falso Alarme (PFA)

Suponha um conjunto de descontinuidades que foram inspecionadas. Definimos como probabilidade de falsa alarme a fração de inspeções que indicaram a presença de descontinuidades onde realmente não há. Essa indicação geralmente é dada pelo nível de ruído do sistema e pelo limiar de sinal adotado [15].

A indicação de uma descontinuidade que não existe pode gerar um alto custo de manutenção e reparo de equipamentos, sem ao menos existir necessidade. Pensando em uma única descontinuidade, pode parecer que o falso alarme não seja um problema, mas pensando em equipamentos como dutos que possuem longa extensão, o problema se torna crítico.

Falsas indicações são muito freqüentes em ensaios que produzem sinais de resposta. Para o caso da técnica ultrassônica, podemos captar sinais de fontes irrelevantes ou oriundos de difrações. Dependendo da filtragem de ruídos definido pelo limiar inferior visto no item III.1.5.3, alguns ruídos podem ser interpretados como sinais de descontinuidades. A figura III.43 mostra a aplicação do limiar inferior para filtrar

sinais que provavelmente são oriundos de ruídos. Neste caso, o limiar foi definido em 40% da altura da tela [21].

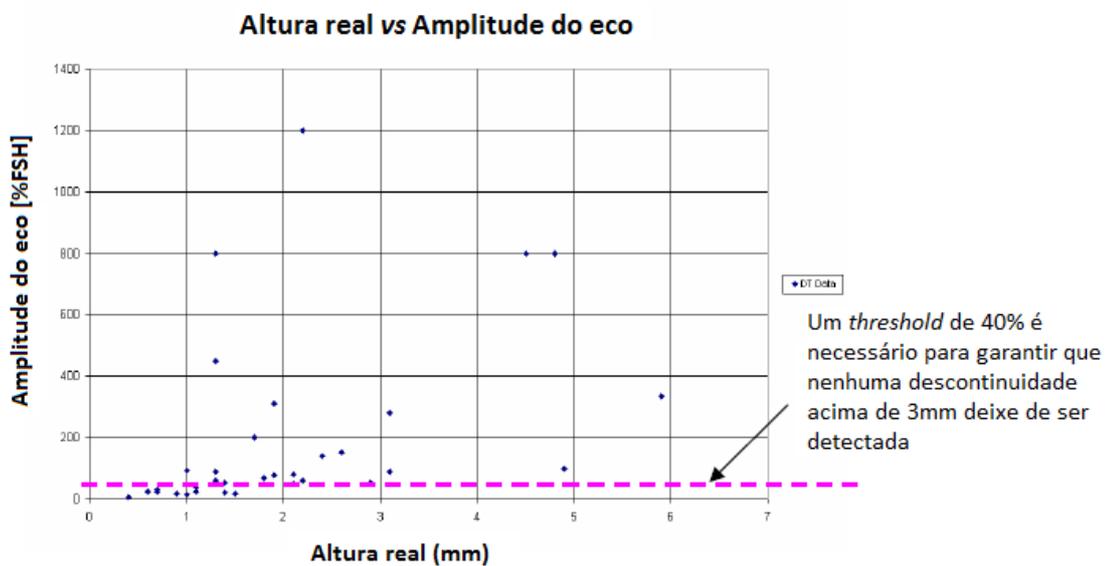


Figura III.43 – Filtragem de ruídos [21]

Conforme visto no item III.1.5.3, eventualmente sinais resultantes da reflexão da raiz de um cordão podem ser interpretados como sinal de uma descontinuidade. Podemos utilizar um limiar superior para esse tipo de sinais, porém um bom inspetor consegue distinguir entre um sinal da raiz e um sinal da descontinuidade. Através do percurso sônico é possível fazer tal distinção.

A fração de descontinuidades inexistentes e que foram “detectadas” também recebe o nome de falso positivo. Esse dado é de suma importância para uma abordagem complementar de quantificar a confiabilidade de ensaios não destrutivos: as curvas ROC.

III.1.10 – Curvas ROC

Quando trabalhamos com detecção de sinais, as curvas ROC (*receiver operating characteristic*) são ferramentas na avaliação da sensibilidade da técnica. Dentro dos ensaios não-destrutivos, a técnica ultrassônica é uma forma de detecção de descontinuidades comumente utilizada.

Por ser uma técnica que trabalha com detecção de sinais, existem quatro possíveis sinais de retorno. Esses podem ser classificados como [2]:

- ✓ Verdadeiro positivo (TP) – descontinuidades existentes e detectadas;
- ✓ Falso positivo (FP) – descontinuidades inexistentes e detectadas;
- ✓ Verdadeiro negativo (TN) – descontinuidades inexistentes e não detectadas;
- ✓ Falso negativo (FN) – descontinuidades existentes e não detectadas.

A figura III.44 apresenta um esquema explicativo das quatro possibilidades de sinais de retorno que o ensaio pode apresentar [22].

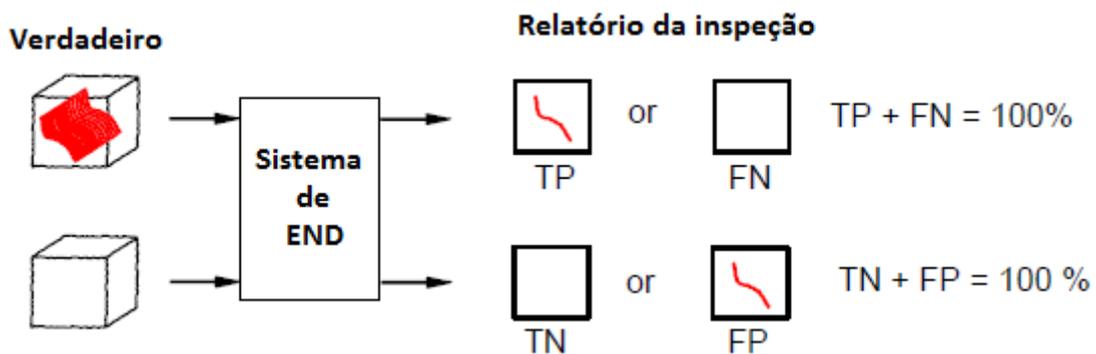


Figura III.44 – Esquema dos quatro possíveis sinais de retorno [22]

As curvas ROC são apresentadas na forma gráfica de um sistema variando de 0 a 1, onde encontramos a relação entre a fração de verdadeiros positivos (PoD) e a fração de falsos positivos (PFA), como podemos ver na figura III.45. A figura apresenta 3 curvas em destaque. Quando o sistema utilizado apresenta a mesma proporção de PoD e PFA, dizemos que o resultado apresentado é função do acaso, e temos uma diagonal a 45° graus que indica esses casos. Um resultado ideal seria aquele que apresentasse alta PoD e PFA tendendo a zero, porém os resultados experimentais geralmente apresentam um comportamento intermediário, se localizando entre o caso ideal e o acaso [2].

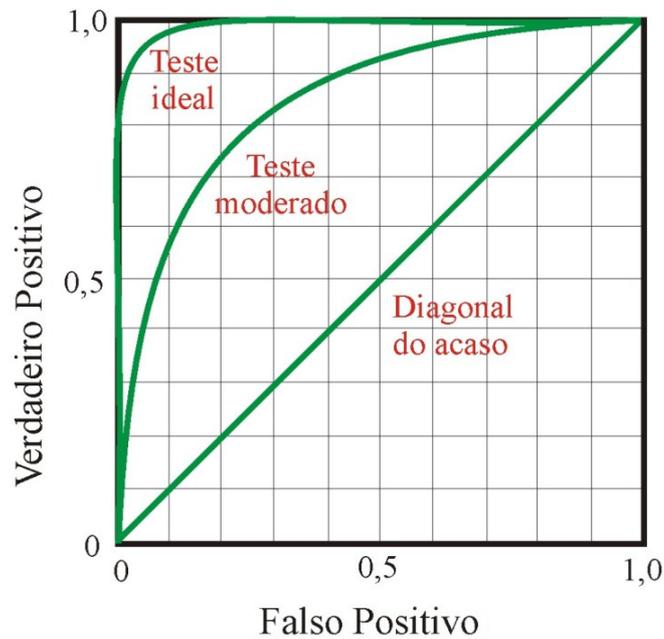


Figura III.45 – Curva ROC [2]

Para calcular os valores referentes a PoD e PFA utilizamos as equações III.13 e III.14. O cálculo da PoD através da equação III.13 é conhecido como sensibilidade da técnica [22].

$$PoD = P(TP) = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{Equação III.13 [22]}$$

$$PFA = P(FP) = \frac{FP}{TN + FP} \quad \text{Equação III.14 [22]}$$

Através de figura III.46 é simples exemplificar como é possível obter as frações necessárias nas equações III.13 e III.14. Para um cordão de solda, podemos dividi-lo em N espaçamentos de mesmo tamanho. Através de uma inspeção pontual em cada quadrante, temos um sinal de resposta da inspeção. Na figura, a dimensão e a localização real da descontinuidade estão representadas pelo traço verde enquanto o sinal obtido como sendo da descontinuidade está indicado pelo traço vermelho. Para cada quadrante, é possível determinar qual dos quatro sinais está realmente ocorrendo. Para achar a fração referente a cada situação, devemos aplicar a razão de quadrantes de cada caso pelo número total de quadrantes N [22].

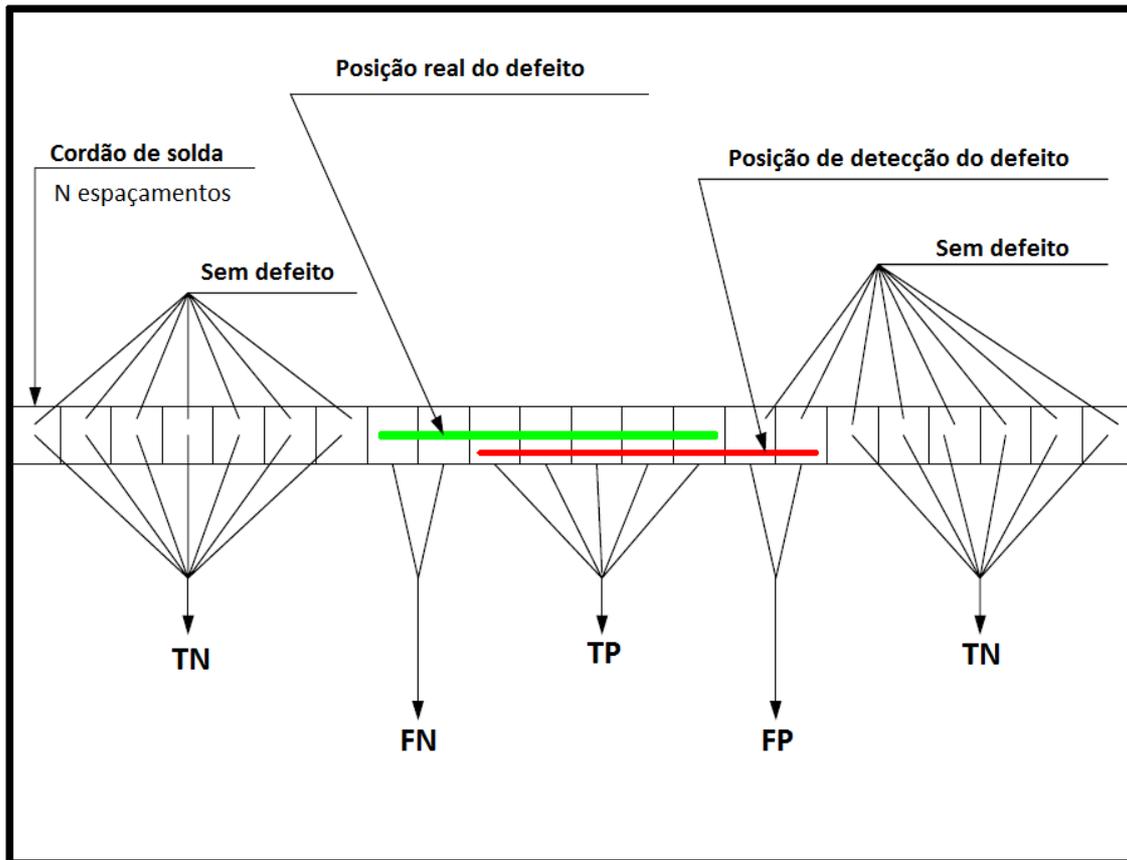


Figura III.46 – Tipos de sinais de retorno ao longo do cordão de solda [22]

A sensibilidade da técnica aumenta conforme caminhamos na curva ROC no sentido do eixo da PFA. Para baixos valores de PFA, o sistema adotado só consegue distinguir sinais de alta amplitude. Conforme este valor aumenta, o sistema aumenta a sensibilidade, captando sinais de mais baixa amplitude. Quando esse fenômeno ocorre, isto é, conforme a sensibilidade aumenta, estamos mais propícios a interpretar ruídos como sinais oriundos de discontinuidades. A figura III.47 apresenta a variação de sensibilidade na curva ROC [22].

Observa-se na figura III.47 que para cada *threshold* (1, 2, 3 e 4), existe um valor de amplitude que serve como limiar de aceitação. Quanto mais alto for valor de corte, como no caso 1, somente sinais do tipo “muito bom” (I) serão considerados como oriundos de defeitos. Neste caso, ambos os valores de PoD e PFA são baixos em função da sensibilidade também ser baixa. Já no caso 4, com uma maior sensibilidade, o corte de sinais é feito para sinais do tipo “ruim” (IV), permitindo que quaisquer sinais do tipo I, II, III e IV sejam considerados como oriundos de um defeito. Sendo assim, tanto os valores de PoD e PFA aumentam consideravelmente.

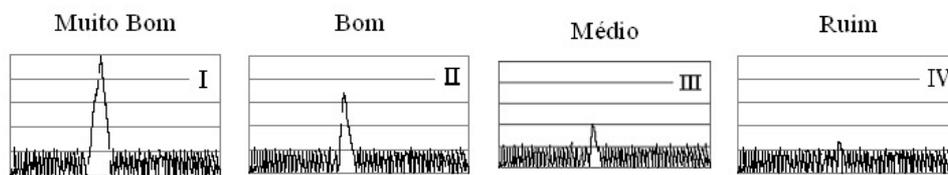
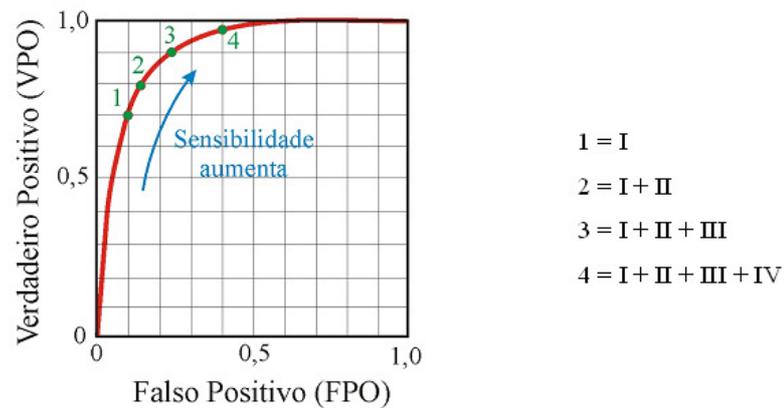


Figura III.47 – Sensibilidade da curva ROC [2]

III.2 – Procedimento ECA

III.2.1 – Mecânica da fratura

Normalmente, defeitos oriundos de um processo de soldagem são detectados e avaliados quanto às suas dimensões por técnicas de ensaios não destrutivos. O objetivo da mecânica da fratura é o de determinar se um defeito irá ou não levar o componente à fratura catastrófica para tensões normais de serviço permitindo, ainda, determinar o seu grau de segurança efetivo. O grande mérito da mecânica da fratura é quantificar valores de tenacidade do material, permitindo projetos que aliem segurança e viabilidade econômica [23-24].

É evidente que a presença de uma trinca afeta a resistência de um componente. Desta forma, durante o crescimento da trinca a resistência estrutural vai sendo minada. O controle do crescimento de uma trinca tem o objetivo de prevenir a fratura frente a carregamentos em serviço [23-24].

Uma forma de prevenir a fratura é fazer com que a resistência não caia abaixo de determinado limite. Isto significa que deve ser evitado que as trincas atinjam tamanhos críticos. São apresentados, assim, dois problemas a serem resolvidos [23]:

- ✓ calcular o tamanho de defeitos admissíveis (deve-se determinar como o tamanho da trinca afeta a resistência global).
- ✓ calcular o tempo de operação em segurança (definição do tempo necessário para uma determinada trinca alcançar o tamanho crítico).

A ferramenta matemática para possibilitar a análise de defeitos permissíveis é a mecânica da fratura. Ela fornece os conceitos e equações utilizadas para determinar como as trincas crescem e quanto podem afetar a resistência de estruturas [23].

A mecânica da fratura divide-se em:

- ✓ mecânica da fratura linear-elástica (MFLE)
- ✓ mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP)

A primeira normalmente é utilizada em situações em que a fratura ocorre ainda no regime linear-elástico. Isto pode ocorrer para ligas de altíssima resistência mecânica ou mesmo em ligas com resistência moderada desde que empregadas em uma espessura razoável. É a espessura que ditará se o regime é o estado plano de deformação (estado triaxial de tensões) em que a mecânica da fratura linear-elástica é aplicável ou o estado de tensão plana (biaxial de tensões) em que a mecânica da fratura elasto-plástica é aplicável [23].

A mecânica da fratura elasto-plástica, possui duas correntes distintas, que procuram resolver os problemas que envolvem materiais com tenacidade elevada que apresentam deformação plástica na ponta da trinca. Estas duas maneiras de encarar o problema são: método *Crack Tip Opening Displacement* (CTOD) e método da Integral J [23].

A avaliação do comportamento à fratura apresentado pelos materiais no regime elasto-plástico é dos mais importantes, uma vez que se trata do regime que normalmente acompanha a maioria das aplicações estruturais envolvendo aços de média e baixa resistência mecânica. No entanto, nem seria de se esperar que fosse possível a obtenção de um parâmetro simples que viesse a traduzir este regime de deformação não linear. Contudo, o desenvolvimento do método CTOD, com auxílio de uma curva de projeto, apresenta-se como uma ótima abordagem, sendo consagrada por uma infinidade de aplicações práticas [23].

Esta metodologia tem o mérito de levar em consideração:

- ✓ tensões residuais
- ✓ efeito de concentradores de tensões
- ✓ tipos de defeitos (internos, superficiais)

Da mesma forma que na MFLE, a abordagem do CTOD, na MFEP, permite relacionar as condições de tensões ou deformações aplicadas com um tamanho de defeito permissível no material. O método CTOD dá uma continuidade à aplicação da mecânica da fratura para o regime elasto-plástico, isto é, para um sistema mais complexo do que aquele regido pela elasticidade [23].

Além de ser aplicado para avaliar a significância de defeitos, a abordagem do CTOD é também usada na seleção de materiais, na qualificação de procedimentos de soldagem, etc. É natural que, por ser uma técnica relativamente recente, apesar de ter se tornado imprescindível para um sem número de aplicações, existam ainda algumas falhas de interpretação. Pode ser citado, como exemplo, exigências de altos valores de CTOD e, além disto, se ater a rigorosos requisitos de qualificação de soldagem. Isto pode levar a casos em que defeitos tridimensionais, porosidades e inclusões de escória em soldas, por exemplo, venham a ser reparados embora possam estar longe de representarem um perigo à estrutura [23].

A Integral J foi proposta para lidar com a presença de deformações plásticas na ponta da trinca e permitiu estender os conceitos da mecânica da fratura além dos limites da MFLE. Utilizando a teoria de deformação plástica e a hipótese de material não linear, uma Integral de linha independente do caminho de integração, denominada de J, é igual à taxa de liberação de energia em sólido com comportamento elástico não-linear. A figura III.48 ilustra o comportamento à tração de um material elástico não-linear e um material elasto-plástico. Como pode ser observado para o caso de carregamento monotônico crescente os dois materiais seguem a mesma curva tensão-deformação, porém, caso ocorra descarregamento, o material elástico não linear irá retornar pela mesma curva enquanto que o material elasto-plástico seguirá uma curva de descarregamento linear com a inclinação igual ao seu módulo de elasticidade. Apesar deste comportamento não necessariamente persistir quando generalizado para três dimensões, existem muitos casos de interesse para os quais esta hipótese de igualdade entre esses dois tipos de materiais permanece válida. Portanto, uma análise que pressuponha comportamento elástico não-linear pode ser válida para carregamento elasto-plástico, caso não ocorra descarregamento [34].

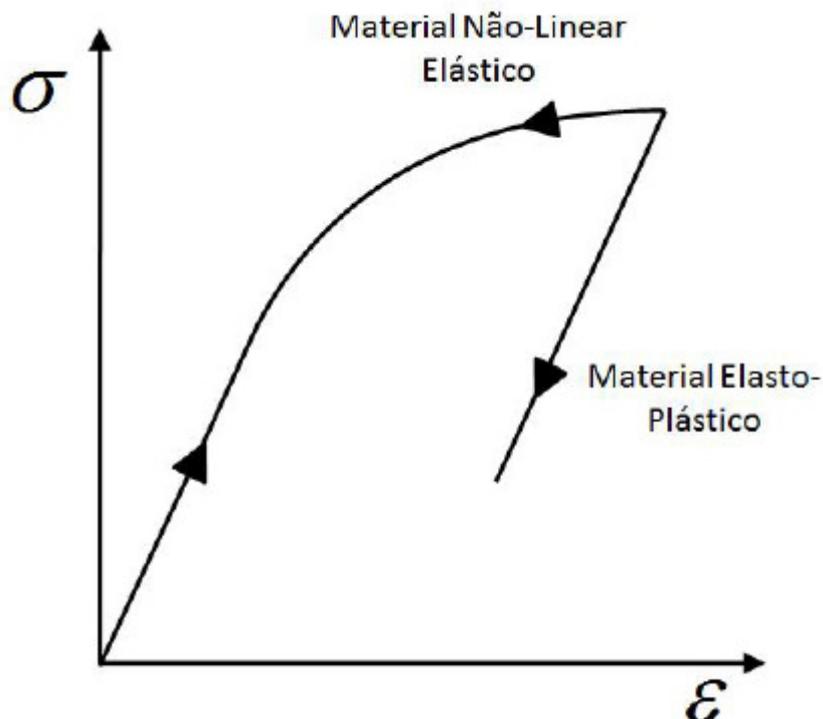


Figura III.48 – Comparação esquemática do comportamento tensão-deformação de materiais elástico não-lineares e elasto-plástico [34]

Considerando um contorno arbitrário com sentido anti-horário ao redor da ponta da trinca, como ilustrado na figura III.49, a Integral J pode ser definida como:

$$J = \int_{\Gamma} \left[\bar{W} n_1 - P_{ji} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} n_j \right] d\Gamma \quad \text{Equação III.15 [34]}$$

onde:

Γ é um contorno fechado definido sobre um plano normal á frente da trinca, iniciando na face inferior da trinca e terminado na sua face superior;

n_j é o vetor normal exterior ao contorno Γ ;

\bar{W} é a energia de deformação por unidade de volume não deformando;

P_{ji} é a componente cartesiana do tensor de tensões (assimétrica);

u_i é a componente de deslocamento no sistema de coordenadas localizado na frente da trinca;

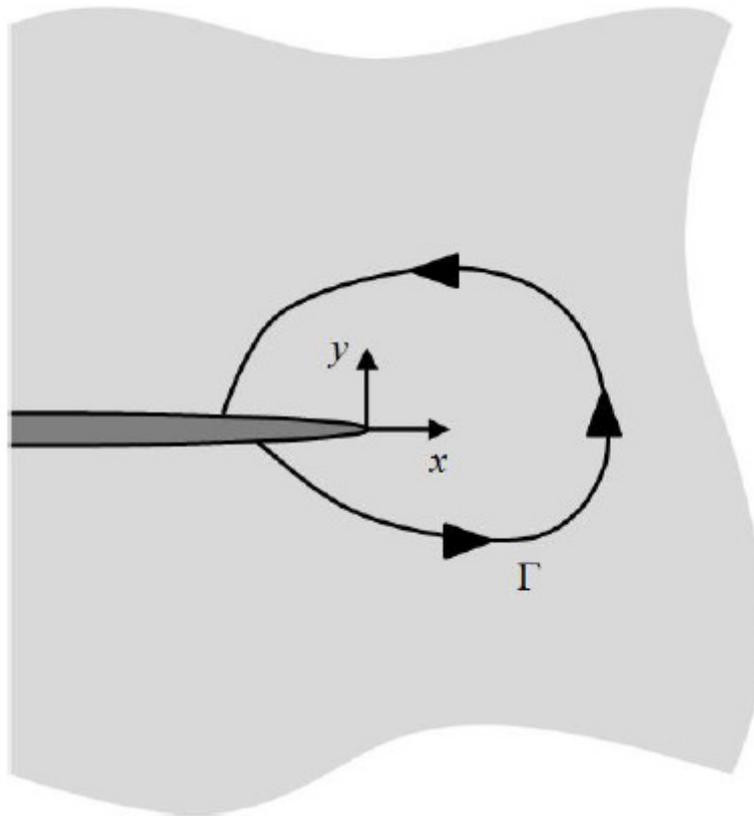


Figura III.49 – Contorno de integração fechado anti-horário para determinação da Integral J

III.2.2 – Avaliação Crítica de Engenharia (ECA)

A integridade de dutos submarinos é uma das questões mais importantes para indústrias *off-shore*. Uma falha por colapso pode trazer um prejuízo financeiro enorme e causar um grande impacto ambiental. Surge então a necessidade de um procedimento de avaliação de integridade para esses tipos de equipamento.

Um procedimento de integridade comumente utilizado é a Avaliação Crítica de Engenharia (“*Engineering Critical Assessment*” - ECA). Quando aplicado para dutos, o principal objetivo dessa avaliação é prover procedimentos e recomendações detalhados para avaliar a integridade de soldas circunferenciais [25].

O procedimento ECA possui a flexibilidade de avaliar tanto deformações estáticas, quanto as dinâmicas. Para um duto, ambas as deformações devem ser consideradas quando a segurança é primordial [25].

Geralmente, as avaliações são utilizadas para obter critérios de aceitação de falha dos resultados do ECA (quando aplicável) e realizar avaliações de ajuste de finalidade como [25]:

- ✓ evitar falhas durante a instalação e/ou operação;
- ✓ avaliar o efeito da mudança de parâmetros operacionais (temperatura, nível de tensão, tempo de vida, etc.);
- ✓ avaliar a significância de descontinuidades de soldagem ou dano ao equipamento, ocorridos depois da instalação.

Falhas podem ocorrer por diversos motivos. Dentro do procedimento ECA, sabe-se que as falhas podem ser evitadas tomando-se certas precauções. Caso a deformação longitudinal ($\epsilon_{l,nom}$) não supere 0,4%, podemos evitar o colapso do duto [25].

Os defeitos de soldagem também podem contribuir para ocasionar falhas. A tabela III.8 apresenta o critério de aceitação do tamanho dos defeitos de soldagem inspecionados pelo ensaio ultrassônico manual. Existem critérios de avaliação para outras técnicas de END e para avaliação de descontinuidades do metal de base. A tabela exemplifica uma condição que se assemelha a que foi utilizada neste trabalho. Para outras condições, deve-se consultar a norma DNV para obter maiores informações [25].

Tabela III.8 – Critério de aceitação de defeitos de soldagem (DNV-OS-F101) [25]

Table D-6 Acceptance criteria for manual ultrasonic testing of welds ^{1) 2) 3) 4) 5) 6)}			
<i>Base material thickness 8 mm ≤ t < 15 mm</i>		<i>Base material thickness 15 mm ≤ t ≤ 150 mm</i>	
<i>Max. echo amplitude</i>	<i>Corresponding acceptable indication length, L (mm)</i>	<i>Max. echo amplitude</i>	<i>Corresponding acceptable indication length, L (mm)</i>
Reference level (DAC)	L ≤ t (but max. 8 mm)	DAC + 4 dB	L ≤ 0,5t (but max. 12,5 mm)
DAC – 6 dB	L > t (but max. 8 mm)	DAC – 2 dB	0,5 t < L ≤ t (but max. 25 mm)
-	-	DAC – 6 dB	L > t (but max. 25 mm in both outer t/3)
-	-	DAC – 6 dB	L > t (but max. 50 mm in middle t/3)
Cracks are not permitted.			
For welds in duplex stainless steel, CRAs and clad/lined steel: Lack of fusion and lack of penetration are not permitted.			
Transverse indications: Indications shall be considered as transverse if the echo amplitude transversely exceeds the echo amplitude from the same indication longitudinally with more than 2 dB. Transverse indications are unacceptable unless proven not to be planar, in which case the acceptance criteria for longitudinal indications apply.			
For indications approaching the maximum permitted length, it shall be confirmed that the indication height is less than 0.2 t or maximum 3 mm (see 903). If an embedded defect is located close to a surface, such that the ligament height is less than half the defect height, the ligament height between the defect and the surface shall be included in the defect height.			
Total accumulation of discontinuities: The total length of acceptable indications with echo amplitude of reference level – 6 dB and above shall not exceed 3 t, maximum 100 mm in any weld length of 300 mm nor more than 12% of total weld length. Any accumulation of defects in any cross section of weld that may constitute a leak path or reduce the effective thickness of weld more than t/3 is not acceptable.			
If only one side of the weld is accessible for testing 6 dB shall be subtracted from the maximum echo permitted above.			
Notes:			
1) Reference level is defined as the echo amplitude corresponding to the echo from the reflector in the reference blocks described in Figure 1, Figure 2 and Figure 3 of this appendix, or equivalent reflector.			
2) All indications exceeding 20% of the reference level shall be investigated to the extent that the operator determines the shape, length and location of the imperfection.			
3) Indications that cannot be established with certainty shall whenever possible be tested with radiography. Indications that are type determined in this way shall meet the acceptance criteria in Table D-5.			
4) Longitudinal imperfections where the echo height intermittently is below and above the acceptance level shall if possible be investigated with radiography. Indications that are determined in this way shall meet the acceptance criteria in Table D-5. If radiography cannot be performed, the length shall not exceed 3 t, maximum 100 mm in any weld length of 300 mm.			
5) Length and depth shall be determined by an appropriate method, see B335 and B336.			
6) Detectable imperfections are not permitted in any intersection of welds.			
7) Systematic imperfections that are distributed at regular distances over the length of the weld are not permitted even if the size of any single imperfection meets the requirements above.			

Como foi visto na tabela III.8, o critério de aceitação de tamanho de defeito é feito em relação à espessura do material analisado. O comprimento pode ser admissível para um certo valor, caso a amplitude do eco máximo esteja de acordo os dados estabelecidos referentes a curva DAC. Algumas situações não podem ser admitidas, como é o caso de trincas e faltas de fusão e penetração em aços duplex.

O material também possui uma parcela importante no controle da prevenção de falhas. Para este ser corretamente especificado para um equipamento deve levar em consideração sua resistência mecânica e resistência contra corrosão. A tabela III.9 apresenta os critérios de aceitação das propriedades mecânicas de dutos. O processamento do material também é relevante para garantir a integridade do mesmo [25].

Tabela III.9 – Critério de aceitação das propriedades mecânicas (DNV-OS-F101) [25]

Table 7-5 C-Mn steel pipe, mechanical properties										
	Yield strength $R_{10.5}$ [MPa]		Tensile strength R_m [MPa]		Ratio $R_{10.5}/R_m$	Elongation in 50.8 mm A_f [%]	Hardness [HV10]		Charpy V-notch energy (KVT) ¹⁾ [J]	
	min.	max.	min. ²⁾	max.			max.	BM, WM	HAZ	average
SMYS										
245	245	450 ³⁾	415	760	0.93	Note 4)	270	300	27	22
290	290	495	415	760			270		30	24
320	320	520	435	760			270		32	27
360	360	525	460	760			270		36	30
390	390	540	490	760			270		39	33
415	415	565	520	760			270		42	35
450	450	570	535	760			270		45	38
485	485	605	570	760			300		50	40
555	555	675	625	825			300		56	45

Notes

- 1) The required KVL (longitudinal direction specimens) values shall be 50% higher than the required KVT values.
- 2) If tested in the longitudinal direction, a minimum tensile strength 5% less than the required value is acceptable.
- 3) For pipe with specified outside diameter < 219.1 mm, the yield strength shall be ≤ 495 MPa.
- 4) The specified minimum elongation A_f , in 50.8 mm, expressed in percent, rounded to the nearest percent shall be as determined using the following equation: $A_f = C \frac{A_{XC}^{0.2}}{U^{0.9}}$ where:
 - C is 1940 for calculations using SI units;
 - A_{XC} is the applicable tensile test piece cross-sectional area, as follows:
 - for round bar test pieces, 130 mm² for 12.5 mm and 8.9 mm diameter test pieces; and 65 mm² for 6.4 mm test pieces
 - for full-section test pieces, the lesser of a) 485 mm² and b) the cross-sectional area of the test piece, calculated using the specified outside diameter and the specified wall thickness of the pipe, rounded to the nearest 10 mm²
 - for strip test pieces, the lesser of a) 485 mm² and b) the cross-sectional area of the test piece, calculated using the specified width of the test piece and the specified wall thickness of the pipe, rounded to the nearest 10 mm², and
 - U is the specified minimum tensile strength, in MPa.

Observa-se que para cada valor de limite de escoamento mínimo específico (SMYS) em dutos de aço C-Mn, existem tensões mínimas e máximas admissíveis para o limite de escoamento e de resistência do material. Outras grandezas também devem ser avaliadas, assim como dureza e energia no ensaio Charpy. A nota 4 da tabela III.9

apresenta uma maneira de se determinar a porcentagem mínima para deformação do aço em questão.

Dutos utilizados na indústria *off-shore* sofrem com o fenômeno da fadiga. Por estarem expostos as oscilações oriundas das marés, o material especificado deve possuir uma alta resistência a fadiga [25].

Por fim, uma abordagem utilizada para evitar falhas é a aplicação do procedimento ECA, aplicável para aços C-Mn com limite de escoamento mínimo específico acima de 555 MPa, aços inoxidáveis martensíticos com 13% Cr e aços inoxidáveis duplex com 22% e 25% Cr. Cuidados devem tomados caso seja utilizado outro material diferente [25].

Como utiliza a mecânica da fratura, o procedimento ECA emprega o ensaio CTOD ou integral J visando obter o valor de tamanho admissível em função da abertura ocorrida na ponta da trinca [25].

Dependendo do nível de deformação monotônica e cíclica, a avaliação do procedimento e os testes requeridos podem ser divididos nas seguintes categorias abaixo e serão melhores abordadas a seguir.

- ✓ ECA estático - baixo (genérico); C
- ✓ ECA estático - baixo (completo); E
- ✓ ECA estático – alto (genérico); D
- ✓ ECA estático – alto (completo); E
- ✓ ECA fadiga. F

A figura III.50 ilustra um típico processo do procedimento ECA [25].

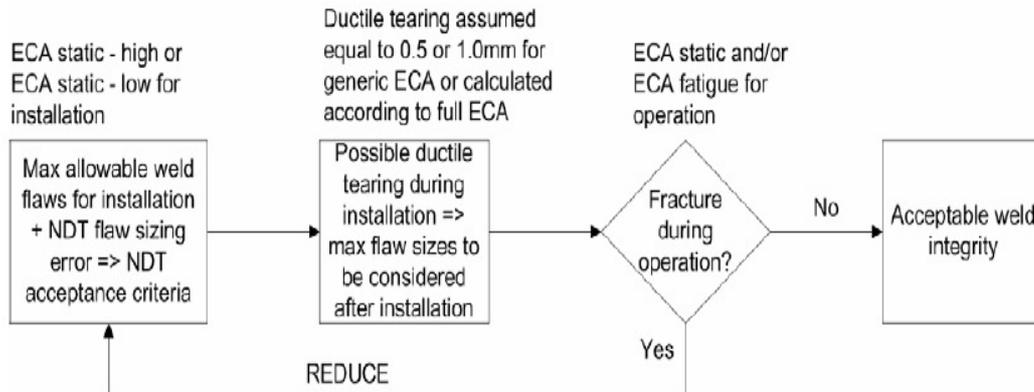


Figura III.50 – Processo ECA [25]

Das categorias acima, as que se aplicam em dutos são “ECA estático – baixo”, “ECA estático – alto”, “ECA fadiga” ou uma combinação de estático e fadiga. Todas as etapas da fabricação desse equipamento, desde a manufatura até a operação devem ser levadas em conta na avaliação do maior defeito admissível. Se o tamanho do defeito indicar uma potencial falha durante a instalação ou operação baseado no ECA, o tamanho admissível deve ser reduzido [25].

A categoria “ECA estático – baixo” trabalha com a deformação longitudinal máxima ($\epsilon_{l,nom}$) inferior a 0,4%. Este valor de deformação do material em análise pode ser determinado através do procedimento descrito na tabela III.9. Além disso, é adotado como número máximo de ciclos de deformação limitado em 10. Os ensaios necessários para o procedimento nessa categoria estão detalhados na tabela III.10 [25].

Tabela III.10 – Testes para o uso do ECA estático – baixo [25]

Table A-1 Testing required for use of “generic ECA” for strain conditions less than 0.4% ^{1), 2)}		
Type of test	Location	Test quantity
Transverse all weld tensile testing ^{4), 5)}	Transverse girth weld	3
Tensile testing ^{4), 5)}	Parent pipe, longitudinal	3
J testing of SENT specimens ^{5) 6)}	Main line	3 specimens for each notch position, see Appendix B
J testing of SENT specimens ^{5) 6)}	Double joint	3 specimens for each notch position, see Appendix B
J testing of SENT specimens ^{5) 6)}	Through thickness repair (TTR)	3 specimens for each notch position, see Appendix B
J testing of SENT specimens ^{5) 6)}	Partial repair ³⁾	3 specimens for each notch position, see Appendix B

1) All weld procedures which have different essential variables according to Appendix C, Table C-2 shall be tested
 2) The test temperatures and material condition to be tested shall be as specified in Subsection G
 3) If the welding procedure and heat input is equal to the through thickness repair procedure, this testing may be omitted
 4) If production tensile testing is performed at the assessment temperature and full stress-strain curves are established, additional tensile testing is not required
 5) The specimen geometry and test requirements are specified in Appendix B
 6) The blunting shall be included in the tearing length

O ECA genérico também pode ser aplicado a categoria “ECA estático – alto”. Nesse caso a deformação longitudinal máxima ($\epsilon_{l,nom}$) admitida deve estar localizada na faixa de 0,4% até 2,25%. Como na categoria “ECA estático – baixo”, o número de ciclos de deformação não pode superar o valor de 10. Para esta condição, adota-se uma tabela de dados similar a tabela III.10 [25].

Através do valor obtido no ensaio CTOD ou integral J é possível estimar as dimensões admissíveis da descontinuidade. Conhecendo dados do equipamento, como espessura de parede, diâmetro externo, composição e limite de escoamento, as dimensões podem ser obtidas na tabela III.11. Esta tabela é um exemplo para diâmetros entre 8” e 12”. Para diâmetros diferentes, existe uma tabela correspondente. Observa-se que, em alguns casos específicos, é necessário adotar uma abordagem completa ao invés da genérica. Pode-se notar que com os dados solicitados pela tabela III.11, determina-se os tamanhos admissíveis máximos para uma descontinuidade, em milímetros. Os tamanhos obtidos estão descritos através de uma relação $a \times 2c$, onde a é a altura e $2c$ é o comprimento [25].

Tabela III.11 – Valor de integral J para tamanhos admissíveis
(diâmetro entre 8” e 12”) [25]

Table A-2 Characteristic J requirements for different maximum allowable flaw sizes ¹⁾ [N/mm = kJ/m ²]								
Max allowable flaw, $a \times 2c$ [mm] ²⁾	Nominal outer diameter, 8" \leq OD \leq 12", WT = nominal wall thickness							
	C-Mn; SMYS \leq 450		C-Mn; SMYS = 485		C-Mn; SMYS = 555		13Cr	
	$15 \leq$ WT < 25	WT \geq 25	$15 \leq$ WT < 25	WT \geq 25	$15 \leq$ WT < 25	WT \geq 25	$15 \leq$ WT < 25	WT \geq 25
3 \times 50	440	310	480	340	530	460	250	250
4 \times 50	750	450	Full	500	Full	570	440	250
5 \times 50	Full	640	Full	700	Full	780	Full	300
3 \times 100	730	430	790	470	Full	680	480	250
4 \times 100	Full	720	Full	790	Full	Full	Full	400
3 \times 200	Full	650	Full	710	Full	Full	Full	420
4 \times 200	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full	Full
δ_{max} [mm], see E206	1.8	2.5	1.8	2.5	1.8	2.5	1.8	2.5
$a > 5$ mm	Full ECA required							
$2c > 200$ mm	Full ECA required							
WT < 15 mm	Full ECA required							
WT < 10 mm	See A308							
1) Only acceptable if testing as specified in Table A-1 has been performed								
2) Maximum allowable flaw size, $a \times 2c$ refers to height and length respectively of both surface breaking and embedded flaws. If the embedded flaw is located close to the surface (ligament height less than half the flaw height) the ligament height between the flaw and the surface shall be included in the flaw height. The UT/AUT flaw sizing error must be subtracted from the maximum allowable flaw height to establish the UT/AUT weld defect acceptance criteria, see Appendix D and Appendix E								
WT = nominal wall thickness								

O procedimento ECA completo, tanto para o caso estático baixo quanto estático alto, envolve uma metodologia mais sofisticada. Geralmente essa categoria é utilizada em casos de defeitos muito críticos e condições complexas onde há a necessidade de um estudo mais detalhado [25].

Por fim, o “ECA fadiga” deve ser aplicado para condições nas quais o ciclo de deformações é elevado o suficiente para causar danos de fadiga. Essa categoria torna-se uma excelente ferramenta para condições com mais de 10 ciclos de deformação com tensão longitudinal superior a 200MPa [25].

III.3 – ECA e PoD

A combinação entre confiabilidade de ensaios não destrutivos e o procedimento ECA já foi utilizada em diversas áreas da engenharia. Por exemplo, uma estação de energia elétrica de grande abastecimento possui um problema crítico quando, após uma manutenção, a retomada gera altos níveis de tensão em soldas de tubos. Esses altos níveis de tensão propiciam o surgimento de trincas de fadiga na raiz das soldas [31].

Para se determinar o tempo de vida desses equipamentos, análises de tensões por elementos finitos, inspeções periódicas e testes experimentais são realizados [31].

A necessidade de procedimento ECA surge para determinar a significância dos defeitos detectados e dimensionados na raiz das soldas tubulares onde, para esse caso específico, são trincas de fadiga. Para esse caso, a acurácia de dimensionamento deveria ser de $\pm 1\text{mm}$. O ensaio utilizado pela estação de energia elétrica para avaliar a presença dessas discontinuidades foi o “Phased Array”. A figura III.51 apresenta uma imagem da trinca de fadiga na raiz dos cordões de solda [31].

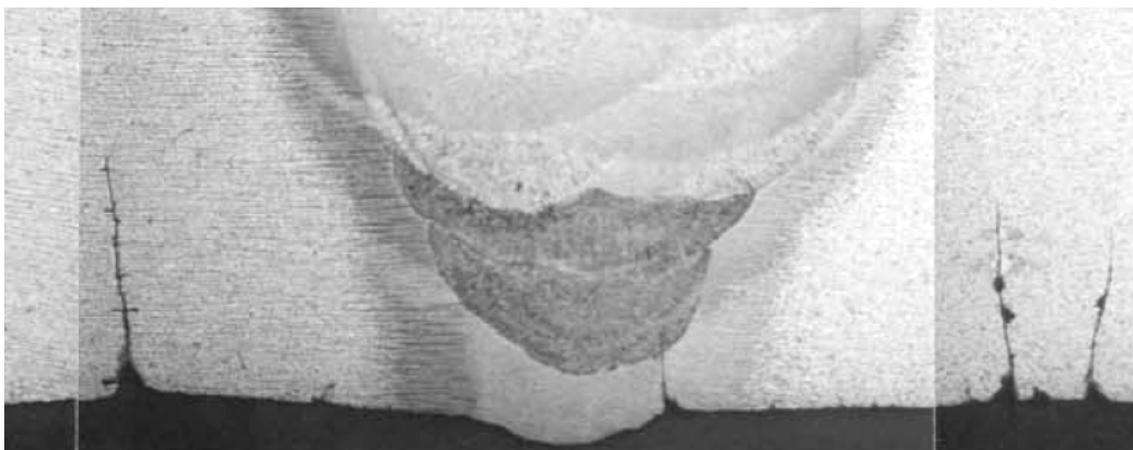


Figura III.51 – Macrografia de trincas de fadiga [31]

Um grupo de 10 corpos de prova foi utilizado para avaliar a confiabilidade de detecção e dimensionamento do ensaio Phased Array. As alturas das trincas variavam de 1,8 até 10mm, como mostra a tabela III.12 [31].

Tabela III.12 – Corpos de prova com as alturas das trincas de fadiga [31]

ID	Espessura (mm)	Altura de trinca (mm)		Altura de trinca (mm)	Ramificação de trinca	Aberta
		Lado Boiler	Lado Tubo	Raiz		
# 10	38	8,2	6,3	3,4	Sim	Não
# 4B	37	3,1	1,8	Sem trinca	Não	Sim
# 1B	38	9,1	6,7	1,1	Não	Não
# 3B	37,1	4,5	2,7	Sem trinca	Não	Sim
# 9B-T1	36,8	7,8	9,5	1	Sim	Ambas
# 9B-T2	36,8	6,7	9,3	1	Sim	Ambas
# 10A	38	6,3	5,5	3	Sim	Não
# 11A	39	8,3	6,2	0,8	Sim	Não
# E1	52	8,1	5,2	0,9	Sim	Sim
# E2	42,3	4,1	3,1	Sem trinca	Não	Sim
# E3	36,9	7,5	3	Sem trinca	Sim	Não

O desempenho geral do ensaio Phased Array no dimensionamento das trincas de fadiga é apresentado na figura III.52. Percebe-se que o sistema subdimensiona as trincas em 0,5mm. Como o subdimensionamento pode trazer riscos para o equipamento, é estabelecido um critério de segurança para o dimensionamento do sistema com base no ECA. Dessa maneira, considera como o valor da altura o valor real somado de 2mm, visando obter um alto grau de segurança [31].

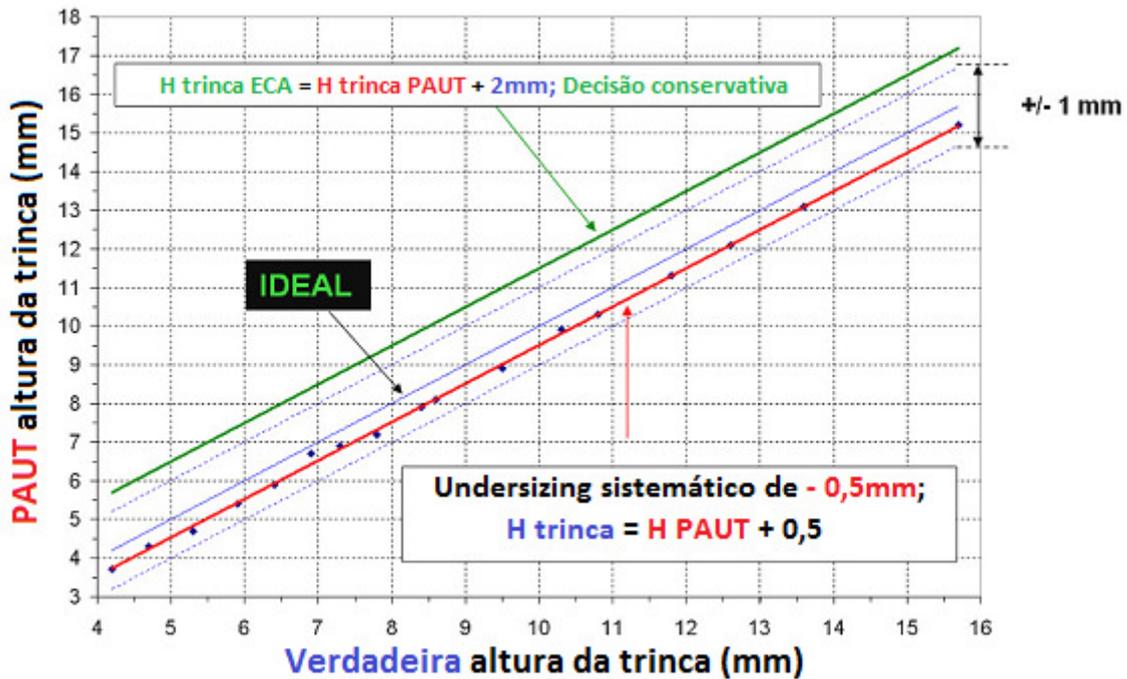


Figura III.52 – Correlação entre as alturas medidas e reais [31]

Com base no procedimento ECA, dois exemplos se encontram na tabela III.13 para avaliação do dimensionamento. O segundo caso, com base no critério de segurança, necessita de reparo [31].

Tabela III.13 – Exemplo de decisão com base no critério de segurança [31]

Tamanho (mm)						
Inspeção 1	Inspeção 2	Inspeção 3	Inspeção 4	Valor adotado da inspeção	Valor do ECA (-2 mm)	Decisão
34,5	34,2	33,9	33,8	34,5	31,8	Monitorar
27,1	27	26,9	26,9	26,9	24,9	Reparar

A revisão apresentada teve como intuito estabelecer um tutorial de análise de confiabilidade para ensaios não destrutivos. Os assuntos abordados foram fundamentais para o planejamento do trabalho desenvolvido e serviram como *feedback* para avaliação dos resultados obtidos. A partir do próximo capítulo será apresentado o desenvolvimento do trabalho e posteriormente, os resultados obtidos com auxílio da da revisão previamente descrita.

Capítulo IV

Materiais e Metodologia

IV.1 – Materiais

IV.1.1 – Corpo de Prova

Foram empregados na confecção do corpo de prova tubos de especificação API 5L X70, com diâmetro de 10”, espessura de parede 19,05mm e comprimento de 6000mm. Neste corpo de prova foram confeccionados 14 soldas circunferências com defeitos inseridos artificialmente por metodologia própria realizadas no momento da deposição dos cordões de solda. Três tipos de defeitos foram inseridos: falta de penetração (FP), falta de fusão (FF) e mordedura (M). Os defeitos estão dispostos ao longo do cordão de solda e distanciados de 45°, no total de 8 defeitos por junta soldada, como foi mostrado na figura III.28.

As soldas foram realizadas em dois processos diferentes: no primeiro processo foi utilizado TIG na raiz da solda e eletrodo revestido no enchimento, no segundo processo utilizou-se TIG na raiz e no enchimento arame tubular.

Os diferentes tipos de defeitos foram dispostos ao longo das soldas no tubo de forma que, para cada tipo de defeito, existisse um par de soldas com alturas diferentes. Além disso, foram realizadas duas soldas onde não há a presença de descontinuidades a fim de verificar a capacidade do inspetor de disseminar entre o que seria um defeito e o que seria ruído. A tabela III.4 apresentou a disposição dos tipos de defeitos ao longo das soldas. A figura IV.1 apresenta o corpo de prova confeccionado.

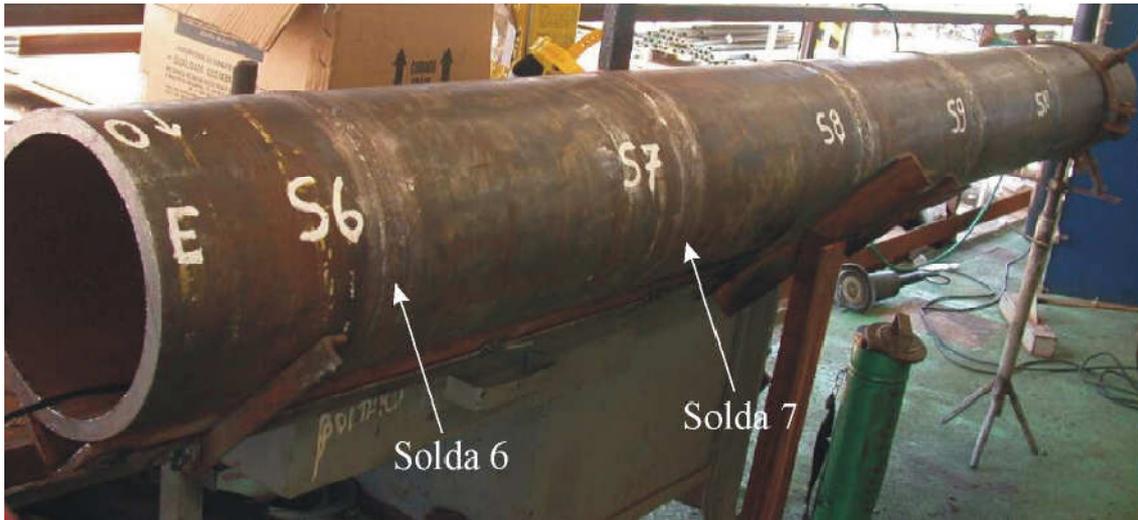


Figura IV.1 – Corpo de prova confeccionado

IV.1.2 – Defeitos

No presente estudo, foram utilizados como tipos de defeitos a falta de penetração e falta de fusão. Como foi visto na tabela III.4, cada tipo de defeito possui espécimes de alturas variadas (1, 2, 4 e 8mm). O comprimento dessas discontinuidades foi projetado para ser de 20mm, porém com o processo de inserção de defeitos adotado na confecção dos cordões de solda não permite afirmar que o comprimento real dos defeitos seja igual ao de projeto.

As figuras IV.2 e IV.3 apresentam, respectivamente, uma representação esquemática dos tipos de defeito falta de penetração e falta de fusão. Apesar dos corpos de prova também possuírem o tipo de defeito mordedura, esse não será utilizado no estudo.

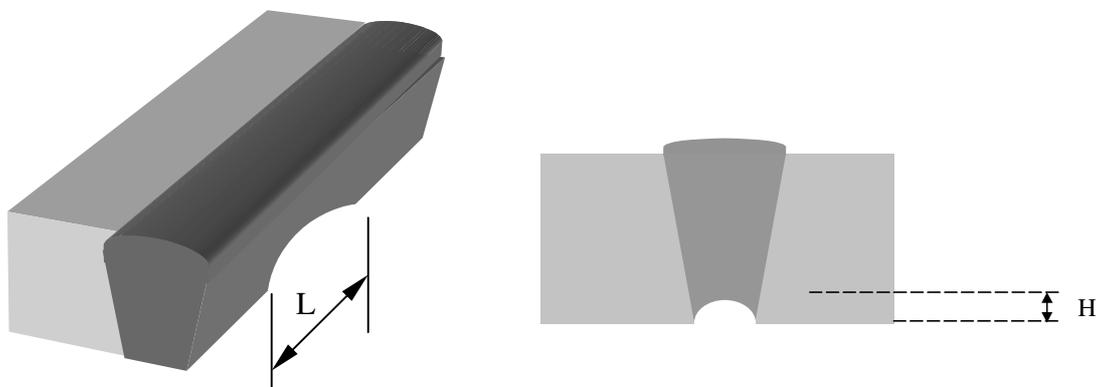


Figura IV.2 – Representação esquemática do tipo de defeito falta de penetração



Figura IV.3 – Representação esquemática do tipo de defeito falta de fusão

Um exemplo de resultado obtido na inserção artificial de defeitos na junta soldadas pode ser observado na figura IV.4. Uma pequena chapa metálica de 20mm de comprimento e alturas variadas (1, 2, 4 e 8 mm) é soldada na parede do chanfro para simular uma falta de fusão. Nota-se que o comprimento final do defeito é diferente do comprimento de projeto de 20mm.



Figura IV.4 - Metodologia empregada para simular defeitos de falta de fusão

IV.2 – Metodologia

IV.2.1 – Planejamento Experimental

Como não faz parte do presente trabalho a destruição dos corpos de prova para determinação do tamanho real das descontinuidades, necessita-se criar um gabarito através dos resultados experimentais de técnicas auxiliares.

Dessa maneira, definiu-se como técnicas auxiliares os seguintes ensaios: Radiografia, ToFD (*Time of Flight Diffraction*) e Ultrassom Automatizado (AUT). Os resultados obtidos dos ensaios auxiliares serviram para definir as medidas mais próximas possível dos valores reais de comprimento e altura dos defeitos.

O foco do trabalho será dado em função do ensaio ultrassônico manual e para isso, 4 inspetores realizaram a inspeção nos corpos de prova. A técnica ultrassônica manual foi aplicada para avaliação da detecção e dimensionamento dos defeitos e avaliação da sensibilidade da técnica.

Posteriormente aos resultados experimentais, foi realizado um estudo de confiabilidade. Através desse estudo, foi possível relacioná-lo com a mecânica da fratura para avaliar a severidade dos defeitos presentes nos corpos de prova.

Como foi mencionado anteriormente, o tipo de defeito mordedura não será avaliado no estudo de confiabilidade, porém todos os ensaios foram realizados em todos os cordões de solda dos corpos de prova.

IV.2.2 – Ensaio Radiográfico

A etapa de inspeção radiográfica foi realizada com raios-gama (fonte cobalto 60) e com raios-X. Duas geometrias de inspeção foram utilizadas: vista simples parede dupla e vista simples parede simples. Inicialmente foi efetuada uma primeira avaliação dos defeitos, empregando-se gamagrafia e geometria de inspeção vista simples parede dupla. Nesta avaliação constatou-se que os defeitos falta de penetração e mordedura foram detectados no filme radiográfico. No entanto, os defeitos de falta de fusão, apesar de ter sido empregado filme radiográfico de grão fino de alta resolução, não foram detectados pelas inspeções por gamagrafia nem por raios-X, mesmo quando se empregou a técnica de vista simples parede simples. Com isto, novas radiografias foram realizadas visando detectar a falta de fusão na parede do chanfro com uma incidência

diferente da normal ao plano da solda. Para os ensaios de gamagrafia foram utilizados 4 filmes por junta soldada e para raios-X foram utilizados 8 filmes por junta.

Sendo um método de inspeção visual, a qualidade das imagens radiográficas é um fator importante na detecção dos defeitos de soldagem, sendo normalmente avaliada através do emprego de indicadores de qualidade de imagem (IQI). Os fatores como tipo de filme, densidade do filme, distância foco-filme, nível de energia da fonte, tempo de exposição e temperatura do revelador devem ser devidamente controlados para que, ao final do ensaio, tenha-se uma imagem com qualidade satisfatória à correta detecção de defeitos. Mesmo quando há um controle rígido dos parâmetros do ensaio radiográfico, as imagens radiográficas apresentam problemas, tais como: existência de ruído, distribuição não uniforme de tons de cinza e contraste insuficiente. Desta maneira, quando existe um defeito muito pequeno no cordão de solda, este pode ser confundido com ruído.

Neste trabalho as imagens radiográficas foram processadas com o objetivo de permitir uma melhor visualização dos defeitos presentes no filme radiográfico, facilitando sua identificação e dimensionamento. Para a realização do processamento foi necessário inicialmente a digitalização dos filmes em um “*scanner*” de alta resolução de fabricação MICTOTEK modelo SCANMAKER 9800XL. Os filmes foram digitalizados com resolução de 1200 dpi (“dots per inch”) e escala de cinza em 256 níveis (8bits), sendo armazenado no formato JPG.

Após a digitalização, a imagem radiográfica foi processada com aplicação de filtros digitais específicos, eliminando ou suavizando eventuais problemas na radiografia. É importante destacar que a aplicação de filtros deverá ser realizada cuidadosamente para que as informações relevantes na imagem não sejam perdidas, o que pode gerar, por exemplo, o sub-dimensionamento de um defeito. Para o tratamento das imagens foi utilizado o programa de análise de imagem *Image Pro Plus 4.0 for Windows*.

IV.2.3 – Ensaio Ultrassônico Automatizado (AUT)

O sistema utilizado neste trabalho foi desenvolvido em projeto do antigo LaboEND[®] com a PETROBRAS. O sistema desenvolvido para inspeção automatizada é composto por um veículo de inspeção com rodas magnéticas, ao qual é fixado uma

régua com um conjunto de sensores responsáveis pela varredura ao longo da solda, um aparelho de ultrassom convencional, um multiplexador para oito transdutores ultrassônicos e um computador para controle do sistema. A figura IV.5 mostra um esquema do sistema e a figura IV.6 mostra a respectiva foto.

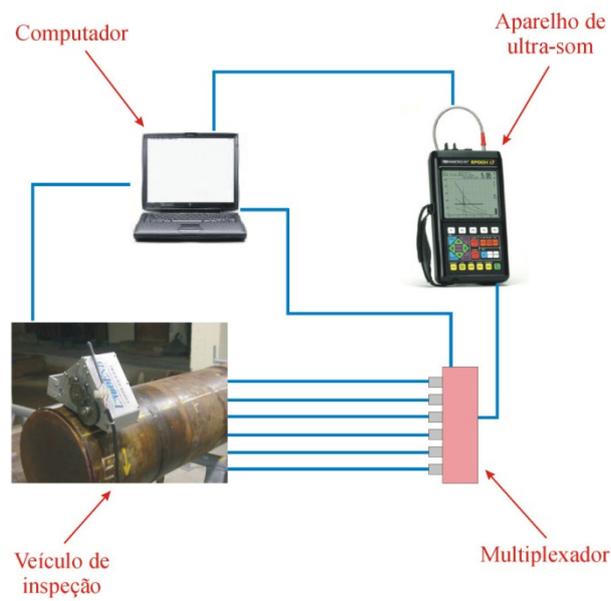


Figura IV.5 - Esquema do sistema para inspeção ultrassônica automatizada

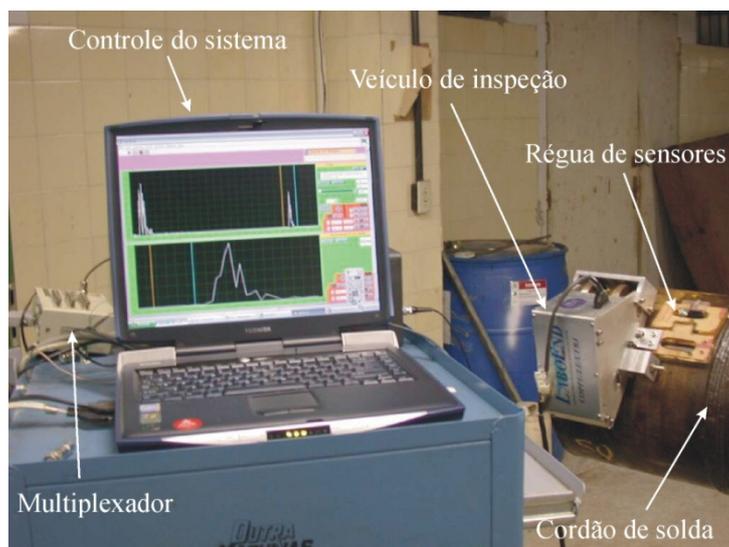


Figura IV.6 - Sistema para inspeção ultrassônica automatizada de soldas

Para a inspeção automatizada dos cordões de solda foi desenvolvido um veículo com o objetivo de deslocar um conjunto de sensores responsáveis pela varredura ao longo do cordão de solda. Este veículo possui rodas magnéticas para permitir a fixação ao duto e este acoplamento possibilita o veículo girar em torno de todo perímetro do duto, mesmo na posição sobre cabeça. Mesmo tendo sido desenvolvido para inspeção de dutos, é possível seu uso para inspeção de soldas em chapas. A figura IV.7 apresenta o veículo de inspeção que foi utilizado.



Figura IV.7 - Veículo de inspeção

A figura IV.8 mostra uma foto da página de configuração dos parâmetros de varredura do sistema, enquanto a figura IV.9 apresenta uma foto da página do programa para aquisição dos sinais. Na janela 1 da figura IV.8 é possível visualizar o sinal A-Scan enquanto é realizada a configuração dos parâmetros necessários para o ensaio, como, por exemplo, o perímetro do duto, espessura de parede, velocidade de aquisição, taxa de amostragem, ângulo do transdutor, entre outros. Na janela 2 é possível monitorar o detalhe do sinal A-Scan que está entre os dois cursores verticais vermelhos da janela 1, o que permite acompanhar uma região de interesse ao longo do sinal, como por exemplo a raiz da solda.

Durante a aquisição do sinal, figura IV.9, é possível acompanhar os oito canais de ultrassom, conforme as janelas à esquerda da figura e em uma escala ampliada é possível selecionar um dos canais e monitorar: o sinal A-Scan (como na figura IV.8) e

o B-Scan, uma vez que o sistema foi desenvolvido para operar tanto com a técnica TOFD quanto com a pulso-eco.

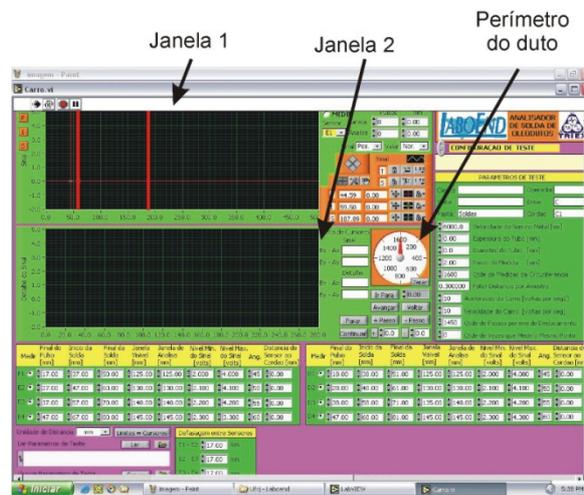


Figura IV.8 - Janela do programa para configuração dos parâmetros de inspeção

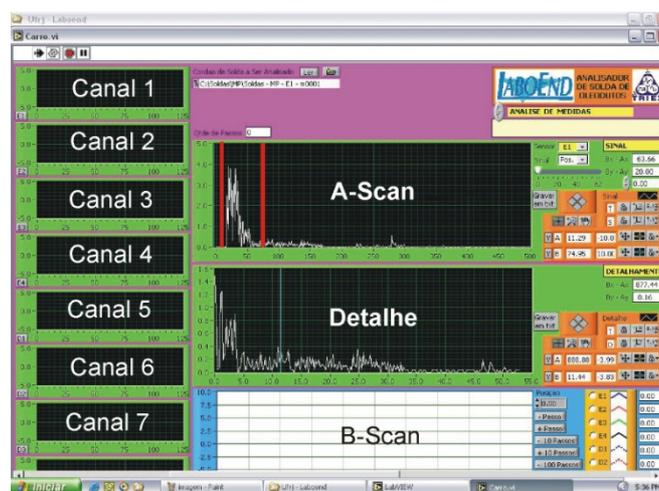


Figura IV.9 - Janela do programa para aquisição dos sinais

IV.2.4 – Ensaio ToFD

Como foi mencionado no final do item IV.2.3, o sistema automatizado permite a inspeção dos corpos de prova através da técnica ToFD.

Para a análise dos resultados foi desenvolvido um programa específico para a leitura dos sinais A-scans e montagem de uma imagem D-scan, conforme figura IV.10. A partir deste programa é possível constatar a presença de discontinuidades ao longo do cordão de solda, determinando seu comprimento ao longo do perímetro do duto e a altura ao longo da espessura da solda. O sinal A-scan da figura IV.10 corresponde à

aquisição representada pela linha horizontal amarela sobre a imagem D-scan. A partir de uma calibração realizada no programa é possível determinar o dimensionamento de todos os defeitos detectados.

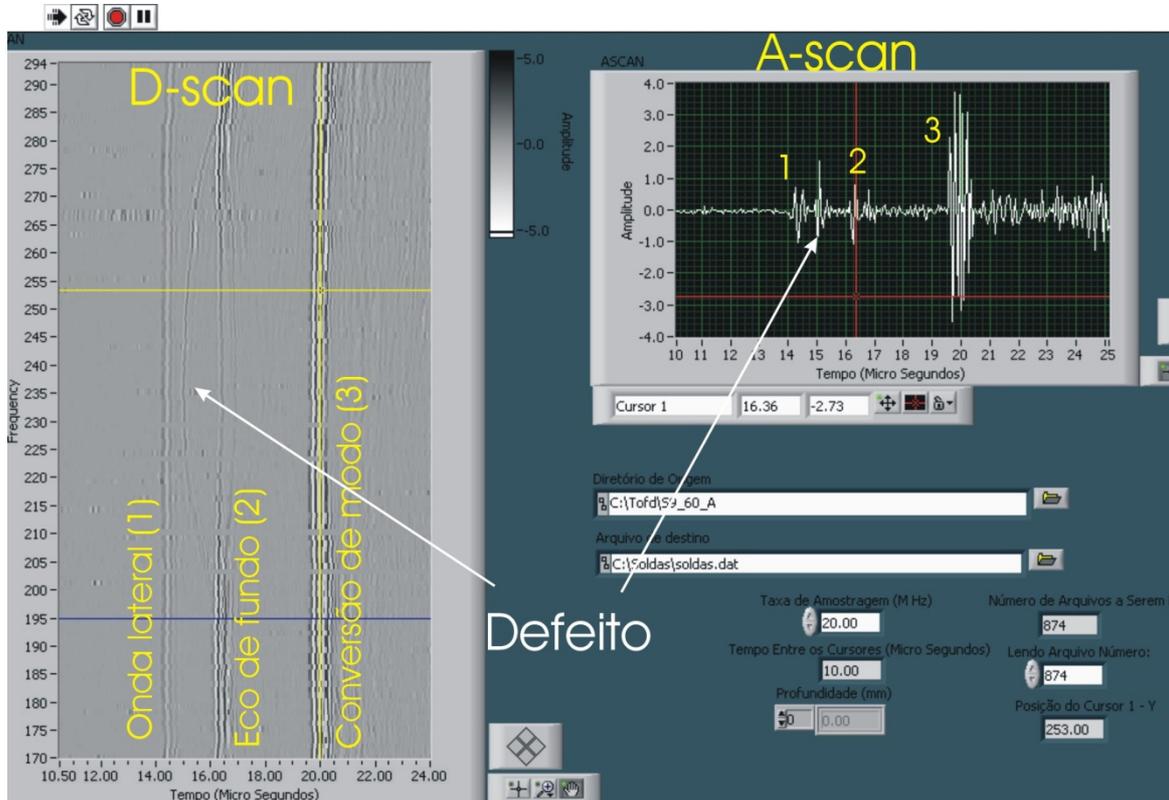


Figura IV.10 - Janela do programa para análise dos resultados da técnica ToFD

Foi utilizado nos ensaios um par de transdutores piezo-compósito tipo normal de onda longitudinal, marca KRAUTKRAMER, 6mm de diâmetro, modelo MSW/QC/PC, com frequência central de 5MHz. Para a obtenção de ondas longitudinais nos ângulos desejados foi utilizado um par de sapatas para ondas longitudinais com ângulo de incidência de 60° no aço. Os transdutores foram dispostos no cordão de solda de modo a proporcionar uma varredura completa da espessura da solda em uma única varredura ao longo do perímetro do duto, conforme figura IV.11.

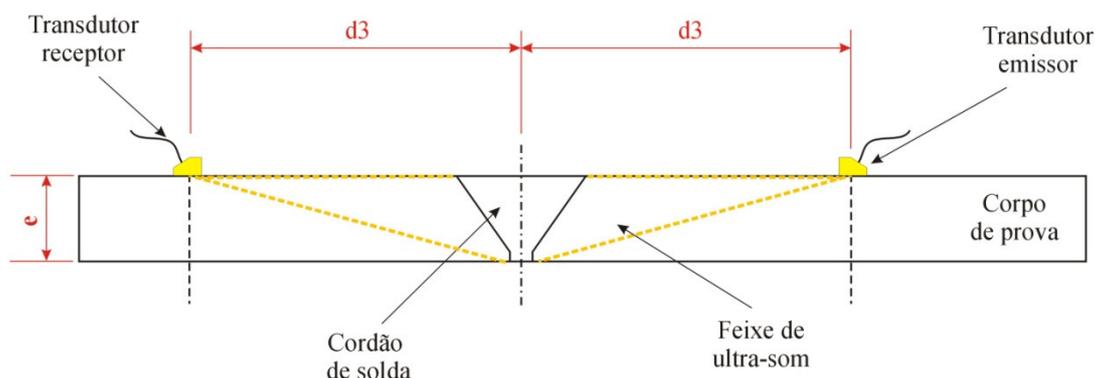


Figura IV.11 - Varredura pela técnica ultra-sônica ToFD

IV.2.5 – Ensaio Ultrassônico Manual

Como a finalidade do presente trabalho é avaliar a confiabilidade do ensaio ultrassônico manual, essa etapa é apresentada em maior detalhe. O estudo da confiabilidade, neste caso, divide-se em desenvolver curvas PoD e ROC. Desta maneira, duas metodologias foram estabelecidas na inspeção ultrassônica manual: inspeção convencional para desenvolvimento de curvas PoD e inspeção pontual para o desenvolvimento de curvas ROC.

IV.2.5.1 – Inspeção Convencional

Com o objetivo de avaliar a confiabilidade da inspeção ultrassônica pulso-eco na detecção e dimensionamento de defeitos, o corpo de prova foi inspecionado por quatro inspetores. Os inspetores são funcionários do laboratório que possuem treinamento na técnica apesar de não apresentam certificação SNQC. Nesta fase do estudo não houve a preocupação em dimensionar a altura “H” do defeito, apenas seu comprimento “L”, como vimos na figura IV.2.

A inspeção ultrassônica foi realizada com equipamento EPOCH III modelo 2300 e EPOCH IV, de fabricação PANAMETRICS, equipado com um transdutor angular de 4 MHz de frequência central e 60° de incidência do feixe sônico no material (transdutor MWV 60). Após a avaliação de transdutores angulares de 45°, 60° e 70°, o transdutor de 60° foi o que apresentou melhor resposta em termos de detectabilidade e, por esse motivo, foi utilizado nos ensaios. A figura IV.12 apresenta os equipamentos utilizados.

O dimensionamento do comprimento do defeito foi realizado pelo método dos 6dB e o critério de aceitação utilizado foi a curva de referência primária (DAC), empregando corpo de prova normalizado segundo o código ASME seção V.



Figura IV.12 – Aparelhos ultrassônicos utilizados

IV.2.5.2 – Inspeção Pontual

Após realizar a inspeção convencional, foi marcado nos corpos de prova o local com a presença das descontinuidades. O perímetro das soldas circunferenciais foi dividido em partes iguais, com espaçamento de 10mm. Desta maneira, a cada 10mm foi realizada uma inspeção pontual com o objetivo de se medir a magnitude do sinal.

Para o desenvolvimento das curvas ROC é necessário obter as amplitudes dos sinais pontualmente e confrontar com a presença ou não de defeitos. Todos os dados obtidos são registrados no relatório de inspeção de curva ROC, criado pelo LNDC. Tal relatório pode ser visto na figura IV.13.

Para a classificação do tipo de sinal em função da curva DAC, foi utilizada a seguinte nomenclatura:

Tipo I: acima da curva de 100%

Tipo II: abaixo da curva de 100% até a curva de 50%

Tipo III: abaixo da curva de 50% até da curva de 20%

Tipo IV: abaixo da curva de 20%

Relatório de Inspeção – Curva ROC

Solda: _____

Posição (mm)	Sinal	Defeito	Posição (mm)	Sinal	Defeito	Posição (mm)	Sinal	Defeito
0			310			620		
10			320			630		
20			330			640		
30			340			650		
40			350			660		
50			360			670		
60			370			680		
70			380			690		
80			390			700		
90			400			710		
100			410			720		
110			420			730		
120			430			740		
130			440			750		
140			450			760		
150			460			770		
160			470			780		
170			480			790		
180			490			800		
190			500			810		
200			510			820		
210			520			830		
220			530			840		
230			540			850		
240			550			860		
250			560			870		
260			570			880		
270			580			890		
280			590			900		
290			600			910		
300			610			920		

Figura IV.13 – Relatório de inspeção para curva ROC

IV.2.6 – Desenvolvimento das Curvas

IV.2.6.1 – Curvas PoD

Como já foi mencionado anteriormente, as curvas PoD são o foco principal do estudo de confiabilidade do presente trabalho. Para isso, é necessário a criação de um banco de dados completo, com todas as informações de inspeção.

Com este banco de dados, é possível estabelecer comparações entre variáveis de inspeção, compreendendo melhor os fatores predominantes que influenciam a confiabilidade de um ensaio não destrutivo.

A modelagem da curva foi realizada com o auxílio do *software* mh 1823 para obter os parâmetros estatísticos (a_{90} e a_{50}) e posteriormente foi utilizado o Microsoft Excel[®] para traçar as curvas. Com o intuito de avaliar as variáveis, foram criadas algumas etapas para o desenvolvimento das curvas:

Etapa 1: comparar as análises

Com os resultados do ensaio ultrassônico manual, foi possível estabelecer uma comparação para a análise de dados hit/miss e \hat{a} versus a . Para a última análise, o valor de \hat{a} que será utilizado será o comprimento medido. Nessa etapa somente serão montadas curvas PoD usando como dimensão o comprimento.

As inspeções dos quatro inspetores que realizaram o ensaio ultrassônico manual serviram como o banco de dados para o desenvolvimento dessas curvas.

Etapa 2: comparar a qualificação dos inspetores

O fator humano é predominante no estudo da confiabilidade e, por isso, foi avaliado neste trabalho. Os quatro inspetores que realizaram a inspeção ultrassônica manual foram comparados através de suas respectivas curvas PoD.

Para essa comparação, foi utilizada a análise *hit/miss* e as curvas foram feitas para o comprimento do defeito.

Etapa 3: comparar os tipos de defeitos

Os dois diferentes tipos de defeito que foram utilizados no presente estudo também foram investigados. A comparação entre eles foi realizada para os resultados dos quatro inspetores.

Foi usada a análise *hit/miss* para modelar curvas PoD em função do comprimento.

Etapa 4: comparar as técnicas

Um objetivo do trabalho era poder comparar as técnicas aplicadas. Dessa maneira, os resultados da inspeção ultrassônica manual, automatizada, ToFD e radiografia foram utilizados para uma avaliação das probabilidades de detecção.

Através da análise *hit/miss*, essas curvas foram desenvolvidas para o comprimento dos defeitos.

Etapa 5: confrontar PoD e ECA

O principal objetivo do trabalho é confrontar os resultados obtidos de confiabilidade do ensaio ultrassônico manual com a mecânica da fratura através do procedimento ECA. Para isso, uma metodologia será aplicada visando avaliar a detectabilidade e severidade de defeitos.

O procedimento ECA não foi realizado para o corpo de prova em função de limitações do trabalho. Seriam necessários ensaios de mecânica da fratura que não poderiam ter sido realizados no laboratório. Sendo assim, serão utilizados dados fornecidos pela PETROBRAS de um tubo com características similares ao do corpo de prova das inspeções realizadas.

Através de um modelo para desenvolvimento de curvas PoD que leva em consideração os parâmetros estatísticos dos valores do banco de dados, foi possível obter uma superfície de probabilidade de detecção. O modelo utilizado é dado pela equação IV.1 [33].

$$p = 1 - \exp \{-(\beta_1 l + \beta_2 h)\} \quad \text{Equação IV.1 [33]}$$

onde:

p é a probabilidade de detecção;

β_1 é o parâmetro estatístico do comprimento obtido;

β_2 é o parâmetro estatístico da altura;

l é o comprimento;

h é a altura;

Através do banco de dados de ensaio ultrassônico manual que consiste nos resultados dos quatro inspetores, do gabarito e da equação IV.1, é possível obter uma superfície de probabilidade de detecção em função do comprimento e da altura. Os resultados do ensaio foram utilizados de maneira binária através da análise *hit/miss*. Com a utilização do *software* STATISTICA[®], foram obtidos os parâmetros β_1 e β_2 para os resultados mencionados. A figura V.14 ilustra o que seria uma distribuição de tamanho de defeitos (comprimento e altura) em função da sua proporção de detecção.

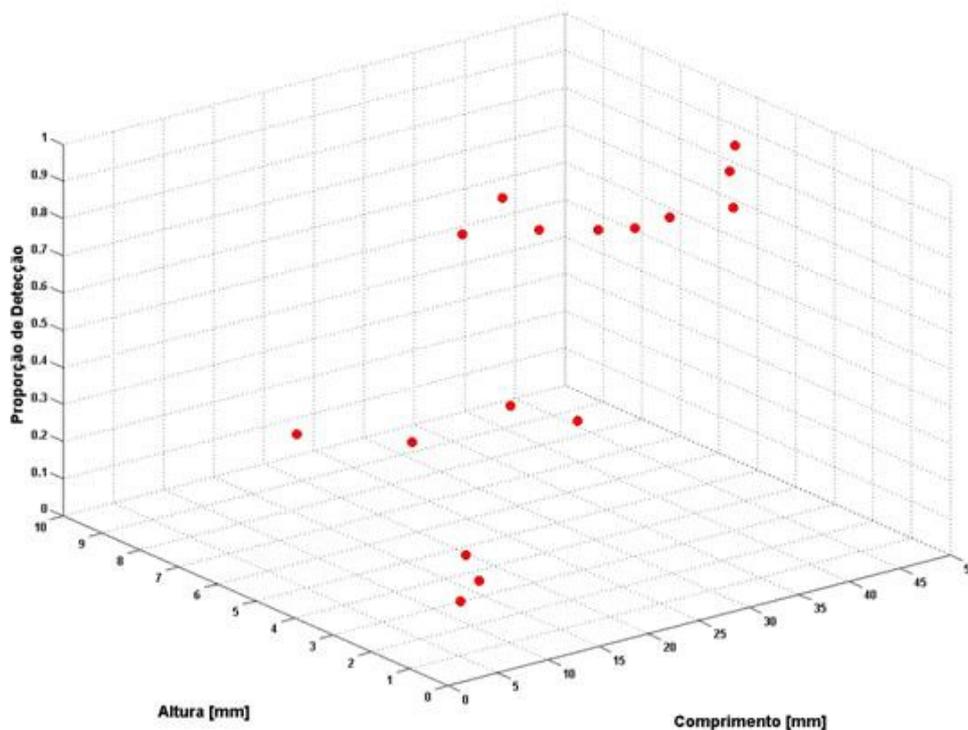


Figura IV.14 – Distribuição de proporção de detecção multivariada

O objetivo dessa etapa é confrontar este gráfico obtido na figura IV.14 com os tamanhos críticos da mecânica da fratura. Pelo procedimento ECA, existe um gráfico com os valores admissíveis de comprimento e altura. Confrontando os dois gráficos, a região em interseção pode ser definida como as possíveis combinações de comprimentos e alturas de defeitos com tamanho admissível pela mecânica da fratura que são detectados com alta probabilidade.

IV.2.6.2 – Curvas ROC

Após o preenchimento do relatório de inspeção de curva ROC, foi desenvolvido um banco de dados com informações sobre o tipo de sinal obtido e a confirmação da presença ou não de defeitos em cada ponto.

Como foi visto no item III.1.10, existem quatro possíveis sinais de retorno. Para classificar cada um deles, foi necessário adotar uma metodologia própria para a classificação dos sinais. Esta metodologia segue descrita a seguir:

- ✓ Tipo I, com defeito: TP
- ✓ Tipo I, sem defeito: FP
- ✓ Tipo II, com defeito: TP
- ✓ Tipo II, sem defeito: FP
- ✓ Tipo III, com defeito: FN
- ✓ Tipo III, sem defeito: TN
- ✓ Tipo IV, com defeito: FN
- ✓ Tipo IV, sem defeito: TN

No mesmo item III.1.10, foram apresentadas duas equações para calcular a PoD a PFA. Para desenvolver a curva ROC, foram necessários cinco pontos. Desta maneira, outra metodologia foi aplicada para a determinação dos cinco pontos. Vale ressaltar que o primeiro ponto da curva é a origem.

A metodologia adotada para a determinação dos quatro pontos, fora a origem, na curva ROC foi em função da sensibilidade da técnica, isto é, dos tipos de sinais que são possíveis de se detectar. A seguir, é detalhada a metodologia empregada:

- ✓ Ponto 1: origem (0,0)
- ✓ Ponto 2: Sinal I
- ✓ Ponto 3: Sinais I e II
- ✓ Ponto 4: Sinais I, II e III
- ✓ Ponto 5: Sinais I, II, III, IV

IV.2.7 – Análise de dimensionamento

A análise do dimensionamento do ensaio ultrassônico manual foi realizada segundo o procedimento do documento DNV Report 2003-3381 e da norma DNV-OS-F101.

Foi criado um banco de dados contendo o valor real, o valor medido e a diferença entre esses dois valores. Como não foi realizada a macrografia dos defeitos para conhecer as suas dimensões reais, foi criado um gabarito com os resultados das técnicas auxiliares (AUT, ToFD e radiografia). Os dados contidos no gabarito serão denominados com a , enquanto os valores medidos serão denominados com \hat{a} .

Com os valores de a e \hat{a} , foi representada graficamente a relação linear entre as duas dimensões, como mostra o exemplo da figura III.19. A bissetriz representa a condição ideal onde o valor medido é igual ao real.

Capítulo V

Resultados e Discussões

Nesse capítulo serão apresentados os resultados das inspeções realizadas por ultrassom manual, automatizado, ToFD e radiografia. Em seguida, os resultados de confiabilidade serão apresentados através de curvas PoD e ROC. Por fim, uma análise correlacionando confiabilidade com mecânica da fratura será mostrada em função de uma curva PoD 3D e ECA.

V.1 – Ultrassom manual

A seguir serão apresentados os resultados obtidos no ensaio ultrassônico realizado pelos quatro inspetores. No caso da inspeção 4 que foi realizada pelo autor, a inspeção foi realizada posteriormente as três primeiras e os cordões de solda 10 e 11 não foram inspecionados pois os mesmos não se encontravam mais disponíveis devido a ensaios destrutivos realizados. A numeração dada para cada inspetor foi estabelecida em função da ordem de inspeção, isto é, o inspetor 1 foi o primeiro e assim por diante.

Uma questão que deve ser levada em consideração na análise desses resultados diz respeito ao fato de ter ocorrido uma possível marcação nos cordões onde o primeiro inspetor identificou a presença dos defeitos. Dessa forma, não se descarta a possibilidade de alguns dos resultados estarem “viciados”. Os valores obtidos podem criar certas limitações na validade das curvas PoD, mas não invalida a metodologia adotada no trabalho. Isto é, não se descarta a possibilidade de uma possível influência nos valores absolutos das curvas PoD, mas por outro lado, os valores relativos e comparativos foram seguramente processados.

Os resultados das inspeções manuais podem ser encontrados nos anexos deste trabalho. A tabela V.1 é um exemplo do registro de cada inspetor. Os valores encontrados nas tabelas representam os comprimentos medidos. Os defeitos não detectados por esta técnica estão evidenciados por “x”.

Tabela V.1 – Resultados da inspeção ultrassônica manual do inspetor 1

	Inspetor 1							
	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Solda 1	34	25	30	34	60	40	48	40
Solda 2	43	50	44	50	49	55	55	61
Solda 3	34	25	28	30	x	35	x	38
Solda 4	19	40	40	30	36	26	29	33
Solda 8	32	37	22	16	11	45	13	21
Solda 9	58	55	65	58	49	38	55	53
Solda 10	x	34	17	38	35	27	26	x
Solda 11	20	19	40	29	22	13	22	29

Comprimento (mm) medido

V.2 – Ultrassom Automatizado

As imagens B-scan referentes aos ensaios automatizados por ultrassom pulso eco para todos os cordões de solda utilizados nesse presente trabalho se encontram no anexo desta dissertação.

Analisando a detecção dos defeitos e, com base nos ecogramas, pode-se concluir que o ensaio ultrassônico automatizado possui uma alta probabilidade de detecção. De todos os defeitos inseridos no corpo de prova somente dois defeitos de falta de fusão na solda 3 e quatro defeitos de falta de fusão na solda 10 não foram detectados.

A tabela V.2 apresenta os dimensionamentos de todos defeitos detectados nos ensaios de pulso-eco automatizado. Este dimensionamento foi realizado sobre a própria imagem B-scan, mas tomando como referência a base do sinal A-scan de início e final do defeito. Os defeitos não detectados por esta técnica estão evidenciados por “x”.

Tabela V.2 - Dimensionamento dos defeitos obtidos por ensaio ultrassônico automatizado

Soldas	Comprimento (mm)							
	Def. 1	Def. 2	Def. 3	Def. 4	Def. 5	Def. 6	Def. 7	Def. 8
Solda 1	45	35	77	47	52	42	51	28
Solda 2	45	51	43	50	60	51	55	42
Solda 3	13	16	x	x	17	31	25	20
Solda 4	34	36	38	31	36	35	34	43
Solda 8	25	49	34	41	45	37	41	67
Solda 9	60	77	48	41	62	77	51	80
Solda 10	9	16	x	32	x	x	16	x
Solda 11	14	31	24	37	43	35	40	47

V.3 – ToFD

As tabelas com os resultados completos da inspeção por ToFD e suas respectivas imagens D-Scan se encontram no anexo da dissertação. A detecção do defeito foi realizada sobre a imagem D-scan e, uma vez que foi constatada a presença do defeito, o mesmo foi dimensionado utilizando o sinal A-scan.

Analisando as detecções dos defeitos obtidas por esta técnica, pode-se concluir que o ensaio ultrassônico automatizado por ToFD possui uma alta probabilidade de detecção. A tabela V.3 e a figura V.1 apresentam um exemplo do registro dos resultados. As células das tabelas que contêm um traço significam que, mesmo o defeito existindo, este não foi detectado. Os resultados obtidos pelo ToFD foram utilizados tanto para conferir a detecção de defeitos como para dimensionamento dos mesmos.

Tabela V.3 - Dimensionamento dos defeitos da solda 2 obtidos por ToFD

Solda 2 - Defeitos de Falta de penetração								
	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Comprimento (mm)	48,15	71,85	65,55	65,37	64,99	50,37	48,45	49,07
Altura (mm)	4,27	11,18	9,79	11,18	10,52	6,3	5,08	4,75
Posição (perímetro)	35,69	141,42	254,38	359	473,81	588,61	686,82	776,19
Posição (altura)	14,5	7,82	8,88	7,82	8,88	12,86	13,92	14,6

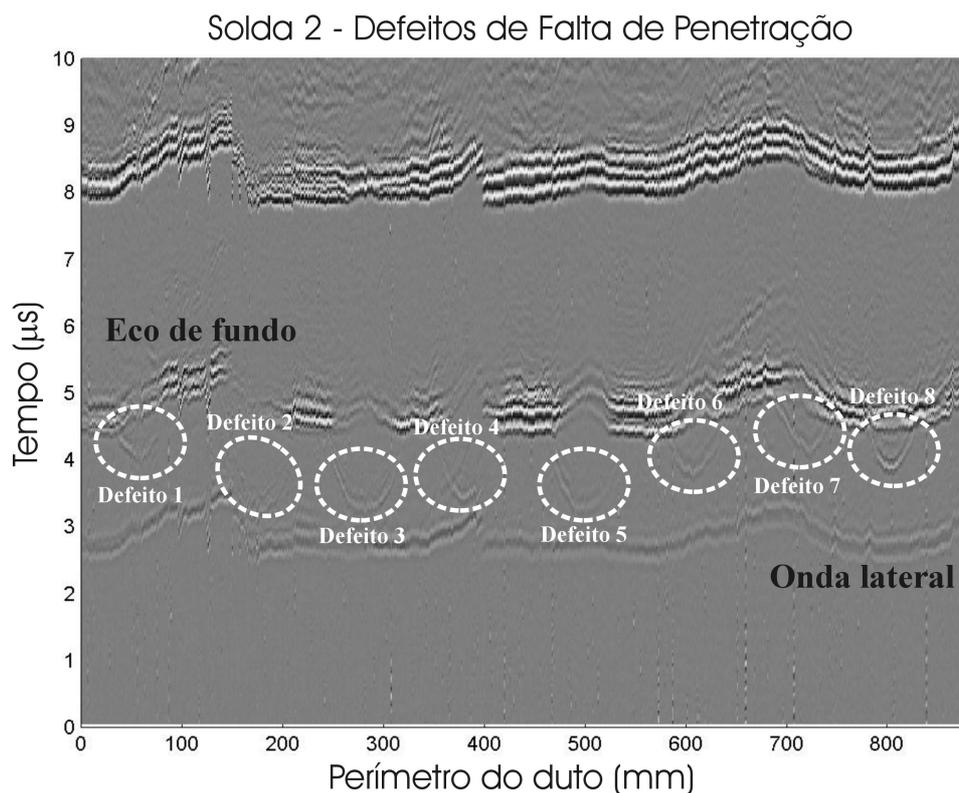


Figura V.1 - Imagem D-scan referente à solda 2

V.4 – Radiografia

Avaliando as radiografias processadas deste trabalho, pode-se concluir que todos os defeitos de falta de penetração (soldas 1, 2, 8 e 9) foram detectados. No entanto, apesar do processamento realizado sobre as radiografias, os defeitos de falta de fusão (soldas 3, 4, 10 e 11) não foram detectados. Este é um resultado coerente, uma vez que todos os defeitos de falta de fusão foram inseridos na parede lateral do chanfro da solda e já foi constatado na literatura que este tipo de defeito pode não ser detectado por ensaio radiográfico na geometria de chanfro utilizada [1].

Na tabela V.4 estão os resultados obtidos no ensaio radiográfico. Os cordões de solda que estão marcados são aqueles em que o ensaio foi feito, como será explicado logo a seguir. Os defeitos que não foram detectados estão indicados com um “x”. Vale ressaltar que o laudo da presença ou não de um defeito foi estabelecido em cima do filme, e não da digitalização do mesmo.

Com o objetivo de determinar os valores dos comprimentos dos defeitos de falta de fusão na parede do chanfro, novas radiografias foram refeitas e foi utilizada uma incidência diferente da normal ao plano da solda. Desta forma, foi possível se obter

alguns dados referentes à falta de fusão, como podemos ver na tabela V.5. A tabela apresenta as dimensões dos defeitos nas juntas 3 e 4. Foram utilizados ângulos de incidência diferentes, visando detectar o defeito. Os defeitos na junta 3 possuíam alturas de 1 e 2 mm enquanto os da junta 4 possuíam a 4 e 8 mm. Analisando a tabela é possível entender a dificuldade de se detectar defeitos oriundos de falta de fusão utilizando a radiografia. Mais da metade dos defeitos não foram localizados e o ensaio para as juntas 10 e 11 não detectou a presença das descontinuidades.

Tabela V.4 – Resultado do ensaio radiográfico

	Radiografia							
	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Solda 1	30	35	35	50	45	50	55	30
Solda 2	43	50	50	60	65	70	70	45
Solda 3	15	4	x	12	14	12	10	x
Solda 4	13	x	20	13	30	x	6	28
Solda 8	50	45	45	40	40	45	40	60
Solda 9	75	80	85	65	60	60	60	80
Solda 10	x	x	x	x	x	x	x	x
Solda 11	x	x	x	x	x	x	x	x

Comprimento (mm) medido

 As radiografias foram refeitas

Tabela V.5 – Dados do ensaio radiográfico nas juntas soldadas 3 e 4

Junta 3						
Ângulo	Posição	Altura = 1 mm	Dimensão (mm)	Posição	Altura = 2 mm	Dimensão (mm)
90°	0 mm	NÃO	-	63,2 mm	SIM	8
35°		NÃO	-		SIM	14
35°		NÃO	-		SIM	14
35°		SIM	15		SIM	14
90°	15,8 mm	NÃO	-	79 mm	NÃO	-
35°		NÃO	-		NÃO	-
35°		SIM	4		SIM	12
35°		NÃO	-		NÃO	-
90°	31,6 mm	NÃO	-	94,8 mm	NÃO	-
35°		NÃO	-		NÃO	-
35°		NÃO	-		SIM	10
35°		NÃO	-		NÃO	-
90°	47,4 mm	NÃO	-	110,6 mm	NÃO	-
35°		SIM	12		NÃO	-
35°		NÃO	-		NÃO	-
35°		NÃO	-		NÃO	-
Junta 4						
Ângulo	Posição	Altura = 4 mm	Dimensão (mm)	Posição	Altura = 8 mm	Dimensão (mm)
90°	0 mm	SIM	13	63,2 mm	NÃO	-
35°		NÃO	-		SIM	30
35°		NÃO	-		SIM	30
35°		NÃO	-		SIM	30
90°	15,8 mm	NÃO	-	79 mm	NÃO	-
35°		NÃO	-		NÃO	-
35°		NÃO	-		NÃO	-
35°		NÃO	-		NÃO	-
90°	31,6 mm	SIM	20	94,8 mm	NÃO	-
35°		NÃO	-		NÃO	-
35°		SIM	10		SIM	6
35°		SIM	17		SIM	6
90°	47,4 mm	NÃO	-	110,6 mm	NÃO	-
35°		NÃO	-		SIM	28
35°		NÃO	-		SIM	28
35°		SIM	13		SIM	28

V.5 – Elaboração do gabarito

Como no presente trabalho não foram realizados ensaios macrográficos nos defeitos para determinação dos comprimentos e das alturas reais, foi necessário adotar uma metodologia alternativa para a criação do gabarito.

Foi observado pelos resultados obtidos das técnicas utilizadas que o comprimento apresentou dimensões bem diferentes das projetadas, enquanto a altura pouco foi alterada. Sendo assim, para elaborar o gabarito utilizou-se os resultados do comprimento medido pelo ultrassom automatizado como gabarito do comprimento. As técnicas ToFD e radiografia foram utilizadas nessa tabela nos casos nos quais AUT não detectou algum defeito. No caso da altura, utilizou-se o valor projetado.

Sendo assim, podemos observar na tabela V.6 o gabarito criado para a análise de confiabilidade. Os valores destacados foram aqueles em não foi possível obter o comprimento pelo AUT e utilizou-se técnicas auxiliares como parâmetro.

Tabela V.6 – Gabarito baseado em AUT

		Gabarito baseado em AUT (Aux: ToFD + RX)							
		Defeito 1		Defeito 2		Defeito 3		Defeito 4	
		Comprimento (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
FP	Solda 1	45	1	35	1	77	1	47	1
	Solda 2	45	4	51	4	43	4	50	4
FF	Solda 3	13	1	16	1	33	1	24	2
	Solda 4	34	4	36	4	38	4	31	4
FP	Solda 8	25	1	49	1	34	1	41	2
	Solda 9	60	4	77	4	48	4	41	8
FF	Solda 10	9	1	16	1	27	1	32	2
	Solda 11	14	4	31	4	24	4	37	8
		Defeito 5		Defeito 6		Defeito 7		Defeito 8	
		Comprimento (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
FP	Solda 1	52	2	42	2	51	2	28	2
	Solda 2	60	8	51	8	55	8	42	8
FF	Solda 3	17	2	31	2	25	2	20	1
	Solda 4	36	8	35	8	34	8	43	8
FP	Solda 8	45	2	37	2	41	2	67	1
	Solda 9	62	8	77	8	51	8	80	4
FF	Solda 10	35	2	34	2	16	2	33	1
	Solda 11	43	8	35	8	40	8	47	4

Uma maneira de visualizar o gabarito é pela figura V.2. Nela, observa-se um mapa da distribuição dos defeitos nos perímetros dos cordões de solda. Os comprimentos do mapa são os mesmo contidos no gabarito.

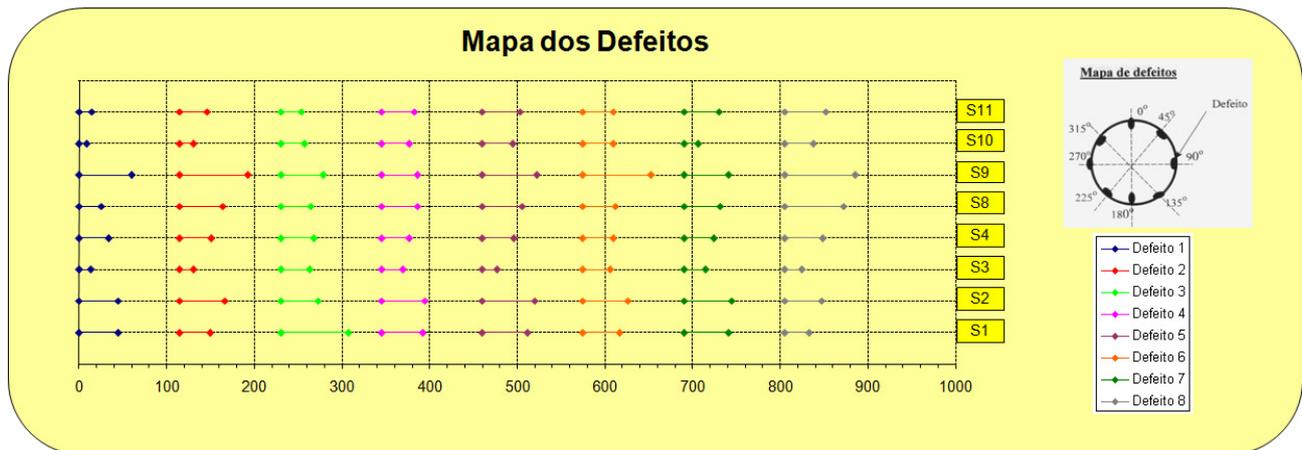


Figura V.2 – Mapa dos defeitos

V.6 – Erro de dimensionamento

Uma maneira de analisar o desempenho de um sistema de inspeção é avaliar o erro do dimensionamento gerado por ele. Com o gabarito preparado, foi possível avaliar o erro de dimensionamento da inspeção ultrassônica manual.

O objetivo dessa avaliação é compreender como o sistema funciona e se ele tende a subdimensionar ou sobredimensionar os defeitos detectados. Além disso, estabelecendo o erro de dimensionamento, podemos fazer curvas PoD através da análise *â versus a*. Nessa análise, em geral, utiliza-se a amplitude do sinal como parâmetro. Porém, neste caso será utilizado o tamanho medido que esteja de acordo com a confiança estabelecida.

Desta forma, para avaliar o erro do dimensionamento criou-se um gráfico relacionando o comprimento do gabarito e o medido pelo ultrassom manual. O ideal é que os pontos se aproximem ao máximo da bissetriz. Tal gráfico pode ser visto na figura V.3.

Como os comprimentos do gabarito não foram obtidos da maneira mais rigorosa (através de macrografia), não se utilizou o intervalo de 95% de confiança para o dimensionamento, como é sugerido pela DNV. Para evitar uma avaliação muito conservadora da análise, utilizou-se 68% de confiança. Nas equações III.11 e III.12 se apresentou as maneiras de se calcular os erros de subdimensionamento e sobredimensionamento para 95% de confiança (praticamente dois desvios padrões). Com essas mesmas equações, porém utilizando somente um desvio padrão se obtém o intervalo de 68% de confiança [27].

Nos itens III.1.8 e III.3 foram mostradas análises de dimensionamento para sistema automatizados. Ao comparar o resultado obtido com os apresentados anteriormente, fica bem claro que o sistema ultrassônico convencional possui um erro bem superior. Isto comprova que a definição de um intervalo de 68% de confiança para o sistema convencional foi devidamente aplicada e que esta adaptação deve ser feita em relação a metodologia aplicada em sistemas automatizados.

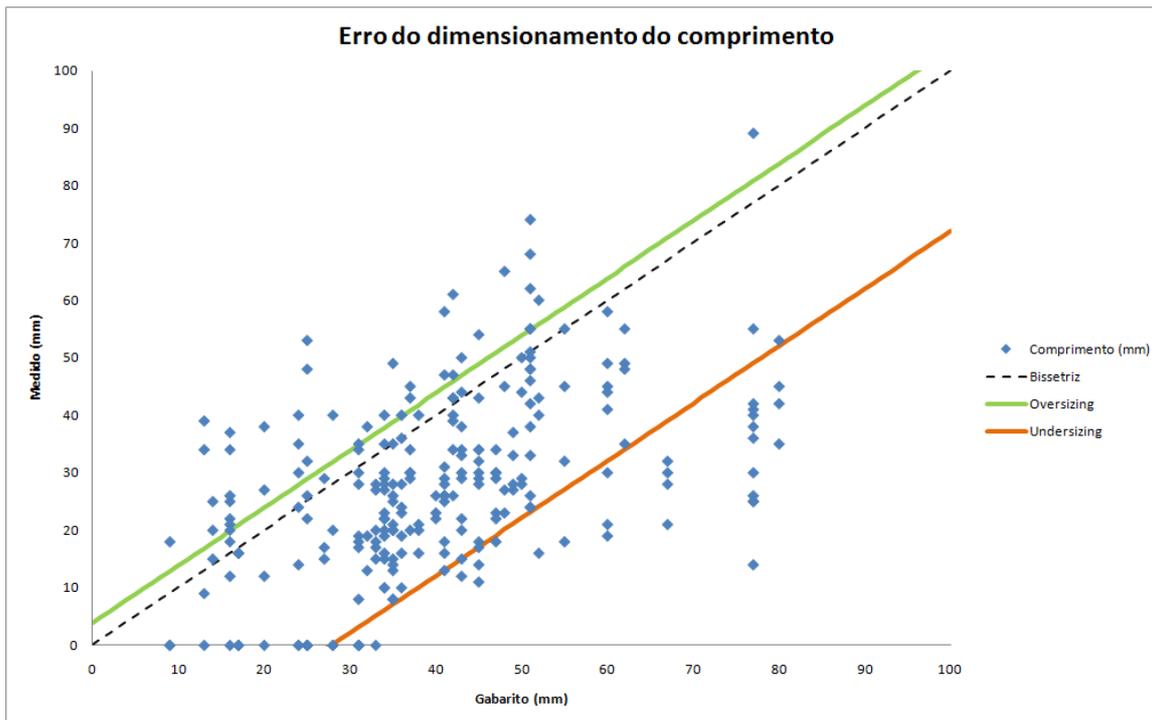


Figura V.3 – Erro do dimensionamento do ensaio ultrassônico manual

Como pode ser visto na figura V.3, somente os defeitos compreendidos entre as retas verdes e laranja estão dentro dos 68% de confiança de dimensionamento (+ ou – um desvio padrão). São esses pontos que entram na análise *â versus a* como defeitos detectados e dimensionados dentro da tolerância. O erro de sobredimensionamento máximo tolerado foi de 3,82mm, enquanto para o subdimensionamento foi de 27,98mm. Esses valores podem ser visualizados na figura V.3 onde as retas dos erros toleráveis cruzam o eixo referente ao gabarito.

Tal análise do erro de dimensionamento se mostrou uma excelente ferramenta na avaliação da dispersão dos pontos onde foi possível comprovar que a técnica ultrassônica manual apresentou valores para o erro bem elevados. Esse resultado deve-se ao fato desta técnica apresentar maior tendência a erros oriundos da falha humana.

Como não se conhecem efetivamente os valores reais dos comprimentos, parte do erro visto na figura V.3 também pode ter origem nos valores adotados no gabarito. Na ausência de dados de macrografia não se pode afirmar que todo o erro de dimensionamento da técnica ultrassônica manual deve-se a fatores intrínsecos da mesma.

A análise do erro de dimensionamento pela DNV é realizada considerando que a distribuição do erro é simétrica. Isto realmente ocorre em função do sistema automatizado ser mais preciso que um sistema manual. A distribuição do erro para o ultrassom convencional não se dá de maneira simétrica, necessitando de uma outra metodologia que descreva melhor tal distribuição. Para o presente trabalho, foi somente aplicada a metodologia da norma DNV e futuramente, um estudo para descrever melhor tal comportamento em inspeções manuais deve ser realizado.

V.7 – Curvas PoD

Os resultados a seguir são referentes à modelagem da curva PoD seguindo a metodologia já previamente explicada nos itens III.1.4 e III.1.5. Como existem inúmeras variáveis que influenciam a probabilidade de detecção de uma descontinuidade, as curvas foram desenvolvidas com o objetivo de analisar algumas dessas influências. Sendo assim, as curvas estão separadas em função da variável de estudo. São essas: análise de dados, inspetores, técnicas e tipos de defeitos. Exceto para a verificação da influência das diferentes técnicas, os resultados que serão apresentados a seguir são referentes à inspeção por ultrassom manual.

V.7.1 – Influência da análise de dados

Na revisão bibliográfica de modelagem de curvas PoD, foram apresentadas as duas análises de dados utilizadas para se desenvolver curvas PoD. É importante quantificar a diferença entre as curvas PoD de um mesmo conjunto de dados, porém modeladas com as duas análises. Avaliar tal influência permite verificar o quanto uma análise é mais conservadora que a outra.

O banco de dados para as duas curvas foi o resultado dos quatro inspetores que realizaram a inspeção ultrassônica manual em todos os cordões de solda. A análise *hit/miss* foi feita da maneira convencional, ou seja, análise binária do resultado de

inspeção dos defeitos. Já a análise \hat{a} versus a foi desenvolvida em função do erro de dimensionamento mostrado no item anterior.

As probabilidades de detecção das duas análises serão mostradas na figura V.4 em função do comprimento. Como a análise \hat{a} versus a passa por um processo de filtragem de sinais de resposta (neste caso, de dimensionamento), o resultado é uma avaliação mais conservadora que a da análise *hit/miss*.

Observa-se que, quando o objetivo de uma inspeção é somente detectar discontinuidades em um equipamento, a análise *hit/miss* torna-se bastante útil e simples. Todavia, caso deseje-se uma análise mais refinada do banco de dados, incluindo avaliação do dimensionamento, filtragem de sinais, utilização de *threshold*, devemos utilizar curvas PoD modeladas através de análise \hat{a} versus a [3].

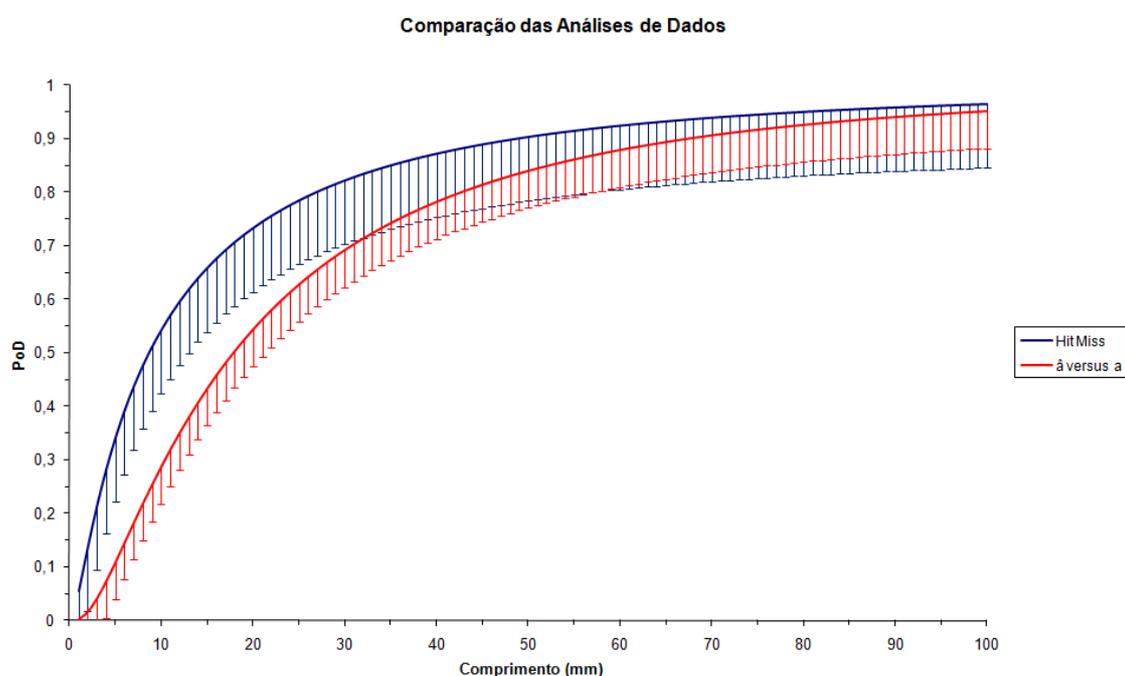


Figura V.4 – Comparação das análises de dados

V.7.2 – Influência de diferentes inspetores

Quando se trabalha com curvas PoD em técnicas que sejam dependentes de um operador para realizar a inspeção, um dos maiores fatores externos atua na inspeção: o fator humano. Sendo assim, comparar os resultados de inspeção de diferentes inspetores para um mesmo conjunto de corpo de prova serve para avaliar a qualificação de um inspetor dentro de um grupo.

O banco de dados foi o resultado da inspeção manual de todos os cordões de solda para cada um desses inspetores. A ordem na denominação dos inspetores está vinculada a ordem de inspeção realizada. Utilizando a análise *hit/miss* foi possível desenvolver as quatro curvas PoD, como pode ser visto na figura V.5.

Para valores de comprimento menores que 10mm, a diferença de PoD entre o inspetor mais qualificado (inspetor 4) e o menos qualificado (inspetor 3) chega a quase 50%. Esse resultado demonstra o quanto a escolha de profissional bem qualificado pode ser essencial para um bom resultado de inspeção.

Perto dos 60mm de comprimento, os resultados começam a convergir para um único resultado. Neste caso, qualquer um dos quatro inspetores conseguiria detectar os defeitos com alta probabilidade. Contudo, antes desse valor ficou claro que o desempenho de cada um foi muito distinto.

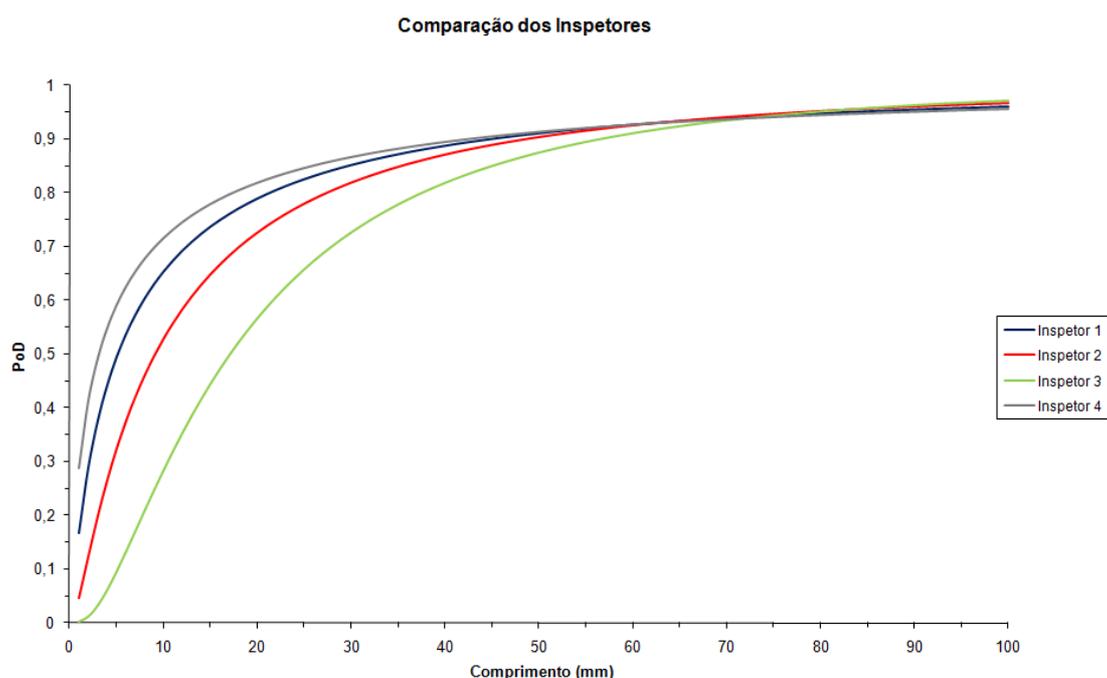


Figura V.5 – Comparação dos diferentes inspetores

V.7.3 – Influência de diferentes técnicas

Um mesmo conjunto de defeitos pode apresentar valores de probabilidade de detecção bem diferentes quando se é inspecionado por técnicas de ensaios não destrutivos diversas. Tomando como conjunto todos os defeitos de todos os cordões de solda, podemos avaliar qual será a melhor técnica que apresenta maior detectabilidade.

Sendo assim, as técnicas ultrassônica manual (resultado dos quatro inspetores), automatizada, ToFD e radiografia foram analisadas através de curvas PoD. A dimensão utilizada foi o comprimento, como mostra a figura V.6.

Observa-se que a técnica ToFD apresentou o melhor desempenho. Os resultados de ultrassom automatizado apresentaram um desempenho bem semelhante ao do ToFD. Em seguida, o ultrassom manual apresentou valores bem mais baixos de probabilidade de detecção em função do fator humano. A radiografia aparece como o pior resultado na comparação das técnicas.

Considerar a radiografia como um ensaio não destrutivo de baixa detectabilidade em função dos resultados vistos na figura V.6 seria um equívoco. Tais resultados somente apresentaram baixa PoD em função da metade do banco de dados ser composto por defeitos do tipo falta de fusão. Sabe-se da limitação da técnica em detectar esse tipo de defeito tendo em vista que a orientação normal da incidência da radiação não permite a detecção de defeitos no chanfro da solda.

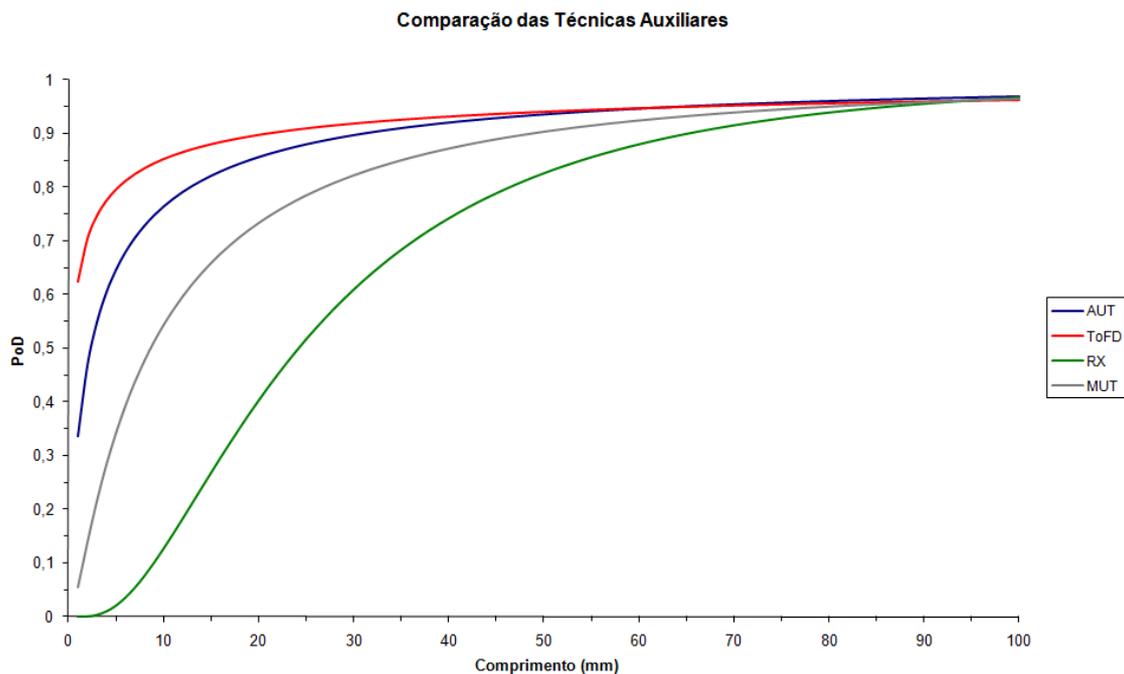


Figura V.6 – Comparação das técnicas de ensaio não destrutivo

V.7.4 – Influência de diferentes tipos de defeito

A classificação do tipo de defeito é uma variável importante quando se avalia a probabilidade de detecção de defeitos. Cada tipo de defeito é caracterizado por uma série de aspectos: localização no cordão, orientação, morfologia, etc.

Dois tipos bem característicos em cordões de solda foram avaliados: falta de fusão (chanfro) e falta de penetração (raiz). Para essa comparação, foi utilizado com banco de dados os resultados das inspeções manuais dos quatro inspetores. A figura V.7 apresenta o resultado da comparação dos tipos de defeito em função do comprimento.

Para a técnica ultrassônica manual, a falta de fusão apresentou valores de PoD superiores em comparação a falta de penetração. Esse resultado deve-se à orientação da falta de fusão, que favorece a reflexão da onda ultrassônica. Uma possível justificativa para a baixa PoD da falta de penetração deve-se ao fato de um inspetor confundir o sinal do defeito com o sinal da raiz, não registrando assim a presença do mesmo.

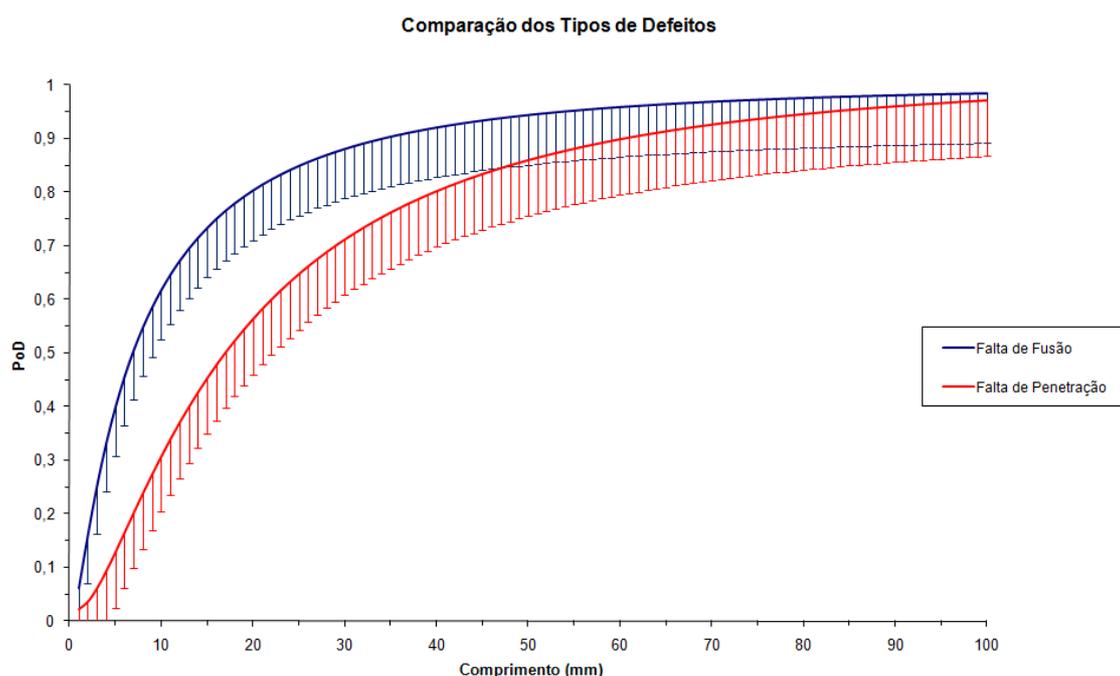


Figura V.7 – Comparação dos tipos de defeito

V.8 – Curvas ROC

A sensibilidade do ensaio ultrassônico manual foi avaliada através das curvas ROC. A metodologia descrita no item IV.2.6.2 foi utilizada e os resultados podem ser vistos na figura V.8. Observa-se na figura a presença de seis curvas ROC referentes aos seis cordões de solda inspecionados. Conforme descrito em V.1, essa análise não foi

realizada com os cordões de solda 10 e 11, que já haviam sido submetidos à análise destrutiva.

Cada ponto de cada curva ROC é referente a um valor de amplitude utilizado como *threshold*. Como vimos no item IV.2.6.2, os valores de *threshold* foram escolhidos em função da curva DAC, classificando os sinais em diferentes tipos (I, II, III e IV).

O resultado geral apresentado na figura V.8 não é suficiente para estabelecer alguma conclusão significativa em função das curvas apresentarem resultados distintos para essa avaliação. Dessa forma, duas análises foram aplicadas: comparação das curvas ROC em função da altura e do tipo de defeito.

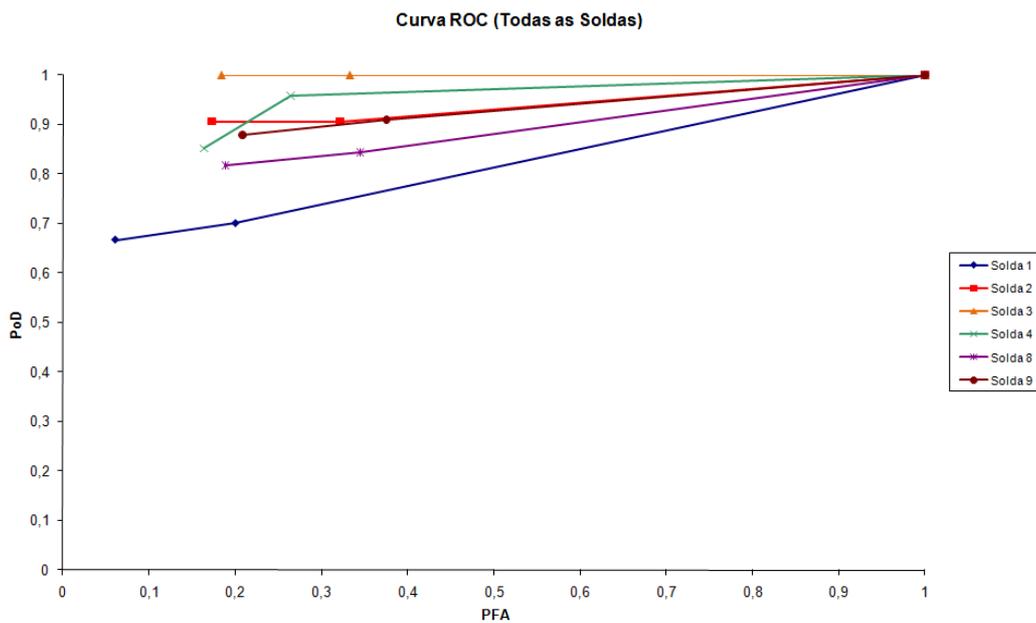


Figura V.8 – Curvas ROC

A figura V.9 apresenta o resultado da comparação das curvas ROC em função da altura dos defeitos. Percebe-se que, para um valor de altura maior (4 e 8 mm), o valor de PoD também é maior. Quando analisamos o valor de PFA, os resultados nos mostram que para pontos equivalentes (com o mesmo *threshold*), os valores de PFA são menores para alturas menores (1 e 2 mm). Porém esses valores de PFA deveriam ser maiores

para alturas menores devido à possibilidade de se considerar um sinal de ruído perante um defeito de pequena medida.

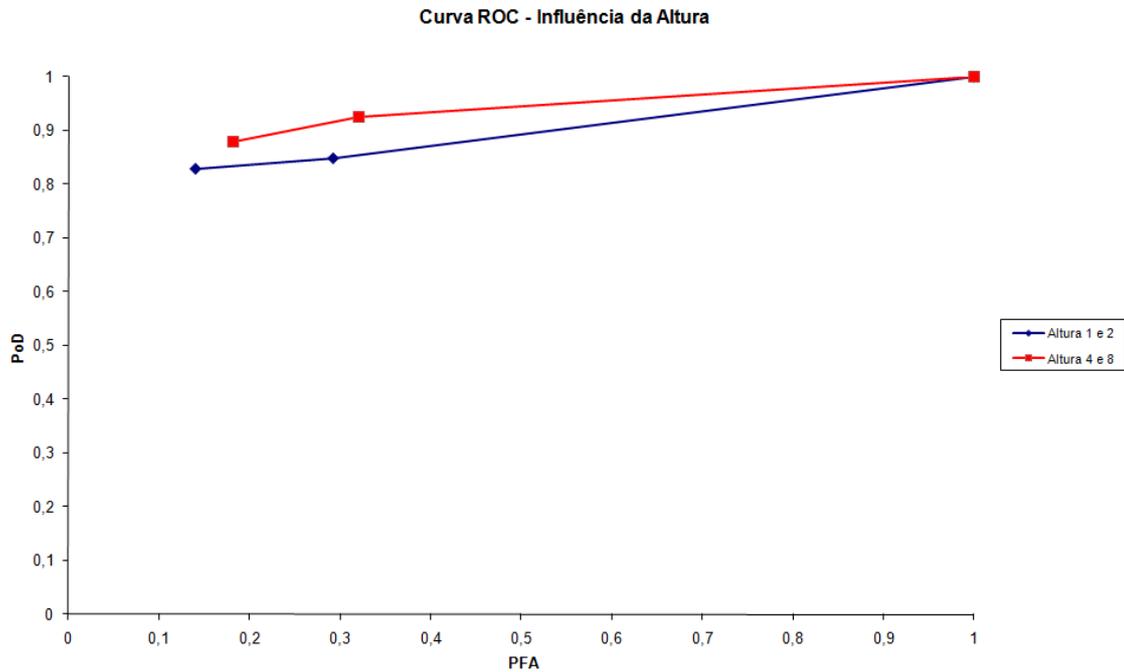


Figura V.9 – Influência da altura nas curvas ROC

Na figura V.10, os valores de PoD são mais elevados para defeitos do tipo falta de penetração que para defeitos do tipo falta de fusão. Isso pode ser explicado pelo fato da falta de penetração ser um defeito na raiz da solda, o que faz com que ele seja, em muitos casos, confundido com um sinal de raiz. Desta maneira, muitos inspetores não registram a presença desse defeito apesar de ter encontrado o seu respectivo sinal. Com relação aos valores de PFA e analisando os pontos das curvas que possuem mesmos valores de amplitude, nota-se que os valores de PFA são muito próximos, não apresentando uma diferença significativa.

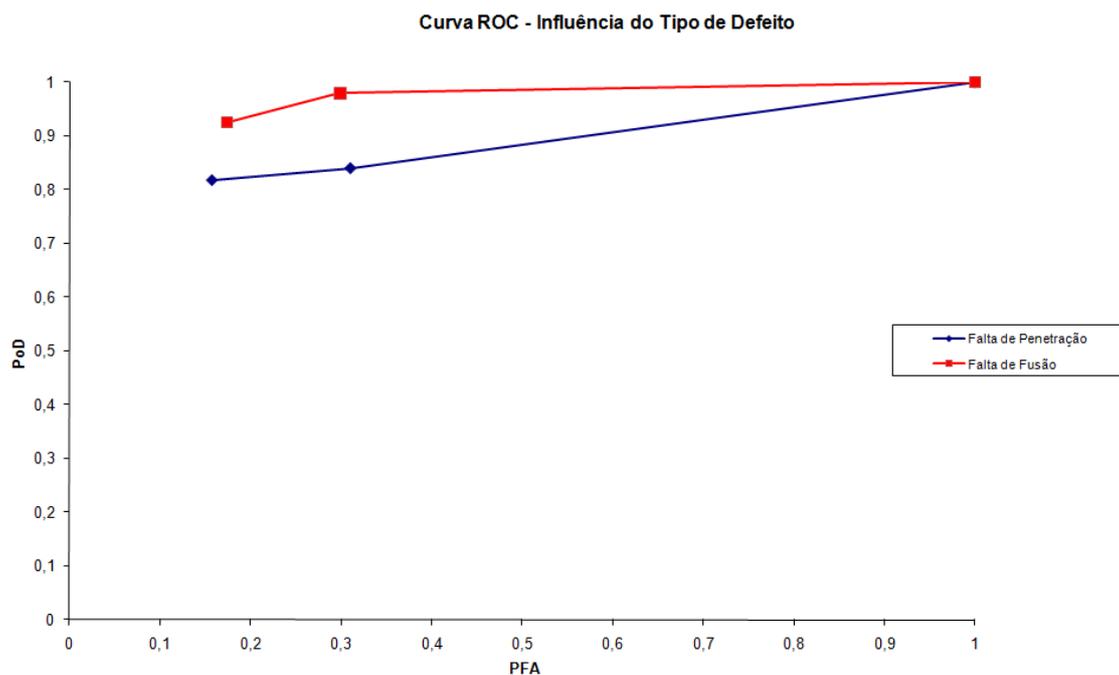


Figura V.10 – Influência do tipo de defeito nas curvas ROC

V.9 – Curvas PoD multivariadas: PoD 3D

Os resultados obtidos no item V.7 mostram a confiabilidade do sistema através de curvas PoD. Porém, os resultados foram apresentados somente em função de uma variável: o comprimento. Na revisão bibliográfica, foi visto que são inúmeros os fatores que influenciam a confiabilidade de um sistema de inspeção. Sendo assim, a possibilidade de avaliar a confiabilidade em função de duas variáveis torna-se uma metodologia interessante para se ter um resultado mais aprimorado. Portanto, foi realizado neste trabalho um estudo da probabilidade de detecção multivariável, analisando não somente o comprimento, mas também a altura dos defeitos.

A figura V.11 apresenta a superfície de PoD, denominada no presente trabalho como PoD 3D. Para desenvolver tal superfície, foi utilizado o *software* Matlab[®]. Ao lado da superfície encontramos uma barra de cores que representa os valores de probabilidade de detecção, sendo que as cores frias são as menores probabilidades enquanto as cores quentes são as maiores.

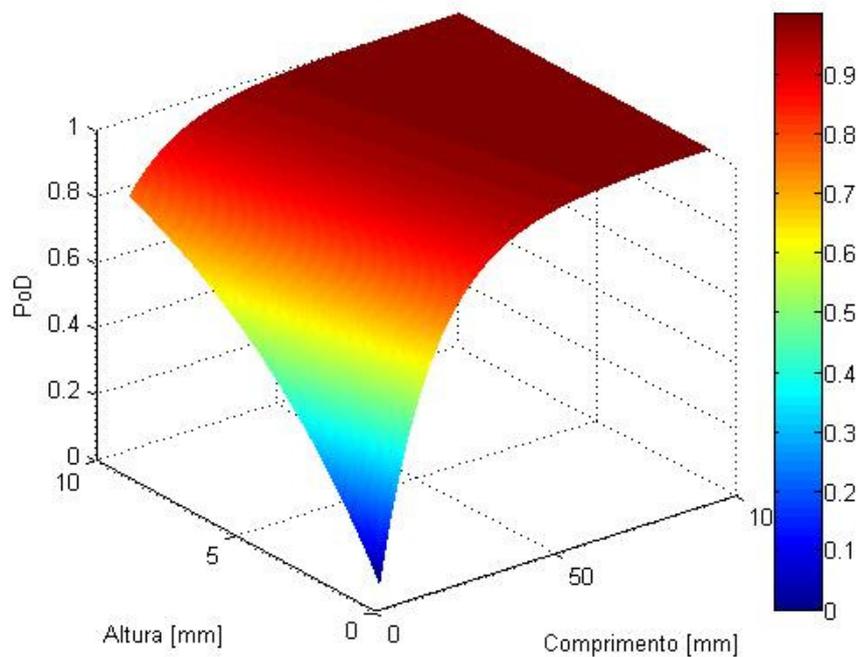


Figura V.11 – PoD 3D para o ensaio ultrassônico manual

Observa-se na figura V.11 que o comprimento apresenta uma maior influência na probabilidade de detecção que a altura. Em outras palavras, pode-se dizer que o comprimento foi a dimensão mais significativa na detecção de defeitos. Esse efeito acaba sendo bastante surpreendente, tendo em vista que a amplitude do sinal está intimamente ligada à altura. Outro fato que deve ser mencionado é que a superfície começa no menor defeito do banco de dados que não foi detectado.

Um dos possíveis motivos para o comprimento ter apresentado uma maior influência na probabilidade de detecção pode ser devido à escala de tamanhos ter sido bem maior que a escala da altura. Em outras palavras, a escala do comprimento variou de 9 até 80mm, enquanto a escala da altura foi apenas de 1 a 8mm, e somente com 4 pontos no intervalo (1, 2, 4 e 8mm).

V.10 – PoD e ECA

O foco principal do trabalho é correlacionar a significância de defeitos com a sua probabilidade de detecção. Apesar de estarem intimamente ligados, não existe uma metodologia simples e eficiente que relacione a mecânica da fratura com os ensaios não destrutivos. A seguir será introduzido o resultado dessa metodologia desenvolvida nessa dissertação que apresenta, de uma única vez, resultados de PoD e ECA.

Como foi visto na revisão bibliográfica, uma metodologia para determinar a significância de defeitos em tubos é o ECA. Para essa análise, era necessário realizar ensaios mecânicos específicos (Integral J e CTOD). Como não foi possível realizar tais ensaios para o corpo de prova em estudo, utilizou-se uma análise ECA para um tubo com características mais próximas possíveis ao do corpo de prova. Essa análise foi fornecida pela PETROBRAS. Nas tabelas V.7 e V.8 estão apresentados os valores de comprimento e altura admissíveis e os dados do tubo, respectivamente.

Tabela V.7 – Valores de comprimento e altura admissíveis

Externo		Interno	
Altura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)
0,8337	197,9475	0,9525	197,7747
1,0111	147,6979	1,1325	147,6667
1,2952	96,9501	1,4325	97,3186
1,4975	76,1121	1,5975	76,8325
1,7775	53,781	1,8325	55,5307
2,0475	40,6218	2,0375	43,8476
2,3175	33,2953	2,1775	37,2351
2,6475	26,3103	2,8975	22,1979
3,1175	18,5427		

Tabela V.8 – Dados do tubo da análise ECA

Lançamento	Reel-Lay, oleoduto, sour
Diâmetro	12"
Espessura	26,97 mm

Com os dados da tabela V.7 foi possível obter um gráfico da análise ECA, como pode ser visto na figura V.12. Observa-se que os defeitos externos e os internos apresentam valores semelhantes.

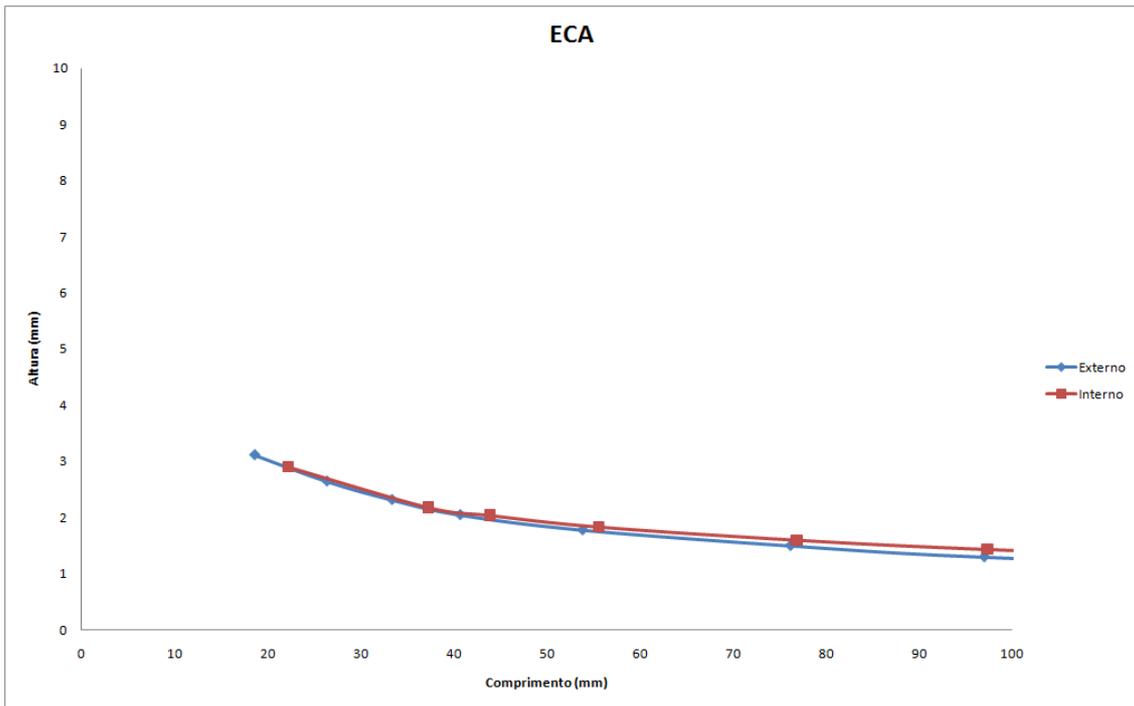


Figura V.12 – Análise ECA para defeitos internos e externos

Atualmente, normas e procedimentos que envolvem probabilidade de detecção possuem como metodologia para análise da confiabilidade de um sistema determinar a dimensão do defeito a que seja referente a 90% de PoD com 95% de confiança. Utilizando a figura V.11, é possível analisar uma vista de topo, como mostra a figura V.13. Na figura, observa-se que as probabilidades de detecção crescem conforme aumentam-se o comprimento e a altura, até atingir uma saturação de 100%.

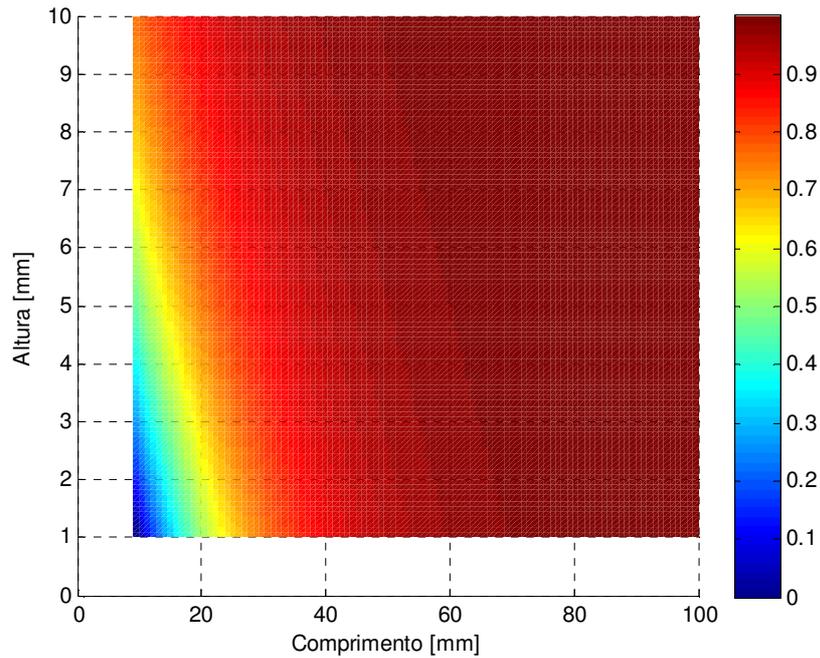


Figura V.13 – Vista de topo da superfície PoD

Na figura V.13 é possível adicionar curvas de nível que seriam referentes às diferentes probabilidades de detecção. Tais curvas podem ser denominadas como “IsoPoDs”. São através dessas IsoPoDs que determina-se os valores de comprimento e altura referentes a uma certa probabilidade de detecção, como, por exemplo 90%, utilizada em normas e procedimentos.

Além das IsoPoDs, pode-se também adicionar as curvas da análise ECA. Como ambas as curvas (defeitos externos e internos) apresentam valores bem próximos, podemos trabalhar somente com uma delas. Nesse caso, escolheu-se a curva dos defeitos externos. Sendo assim, temos como resultado dessa metodologia a figura V.14 que correlaciona PoD com ECA. A linha preta tracejada com pontos (*) representa a análise ECA enquanto as linhas cheias coloridas representam as IsoPoDs em função da barra de cores.

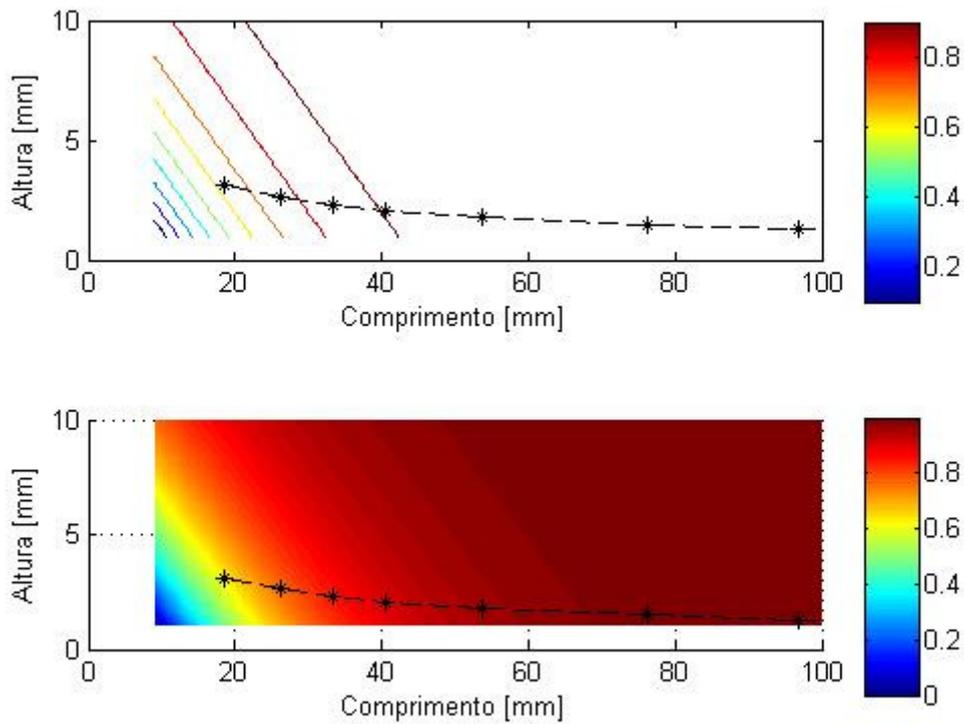


Figura V.14 – Correlação PoD x ECA

A figura V.14 apresentou o resultado da metodologia desenvolvida, onde observa-se uma região delimitada pela IsoPoD de 90% e a curva ECA. Essa região compreende as dimensões (comprimento e altura) admissíveis dos defeitos pela mecânica da fratura e que efetivamente são detectados com 90% de probabilidade de detecção, como se encontra em normas e procedimentos. A figura V.15 apresenta a região mencionada com maiores detalhes. O ponto de interseção da curva 90% PoD com a curva ECA ocorre para defeitos com aproximadamente 39,7mm de comprimento e 2,1mm de altura.

Para esse caso hipotético, a técnica de END se mostrou adequada ao problema em questão, pois defeitos com dimensões maiores que as críticas são detectadas com mais de 90% de probabilidade de detecção.

Observa-se na figura V.15 que existem 4 regiões destacadas: A, B, C e D. A região A já foi comentada, sendo uma região com 90% de PoD e defeitos admissíveis pelas mecânica da fratura. As regiões estão comentadas abaixo:

- ✓ Região A: mais de 90% de PoD, defeitos admissíveis
- ✓ Região B: mais de 90% de PoD, defeitos não admissíveis
- ✓ Região C: menos de 90% de PoD, defeitos não admissíveis
- ✓ Região D: menos de 90% de PoD, defeitos admissíveis

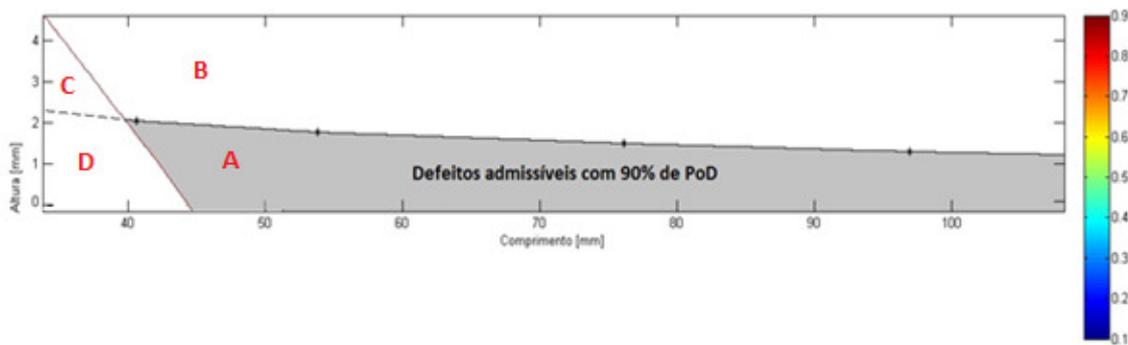


Figura V.15 – Detalhe da região de defeitos admissíveis com 90% de PoD

Observando a figura V.15, podemos analisar outras situações que poderiam ter ocorrido ao final da metodologia, como são os casos ilustrados na figura V.16. Considerando os mesmos valores do ECA, o caso 1 representa uma IsoPoD de 90% localizada bem acima da curva de significância de defeitos. Pode-se notar que esse caso seria o de maior risco para um equipamento a ser inspecionado pelo ultrassom convencional, isso porque nenhuma dos defeitos críticos seria detectado com mais de 90% de PoD. O caso 2 seria uma situação ideal para qualquer técnica não destrutiva. A IsoPoD de 90% se localiza abaixo da curva ECA, isto é, todos os defeitos críticos estão sendo detectados com mais de 90% de probabilidade de detecção.

É importante destacar, entretanto, que essa comparação foi realizada a partir da curva relativa a 90% de PoD, e não aquela correspondente a 90% de PoD com 95% de certeza, como é o usual nestes casos.

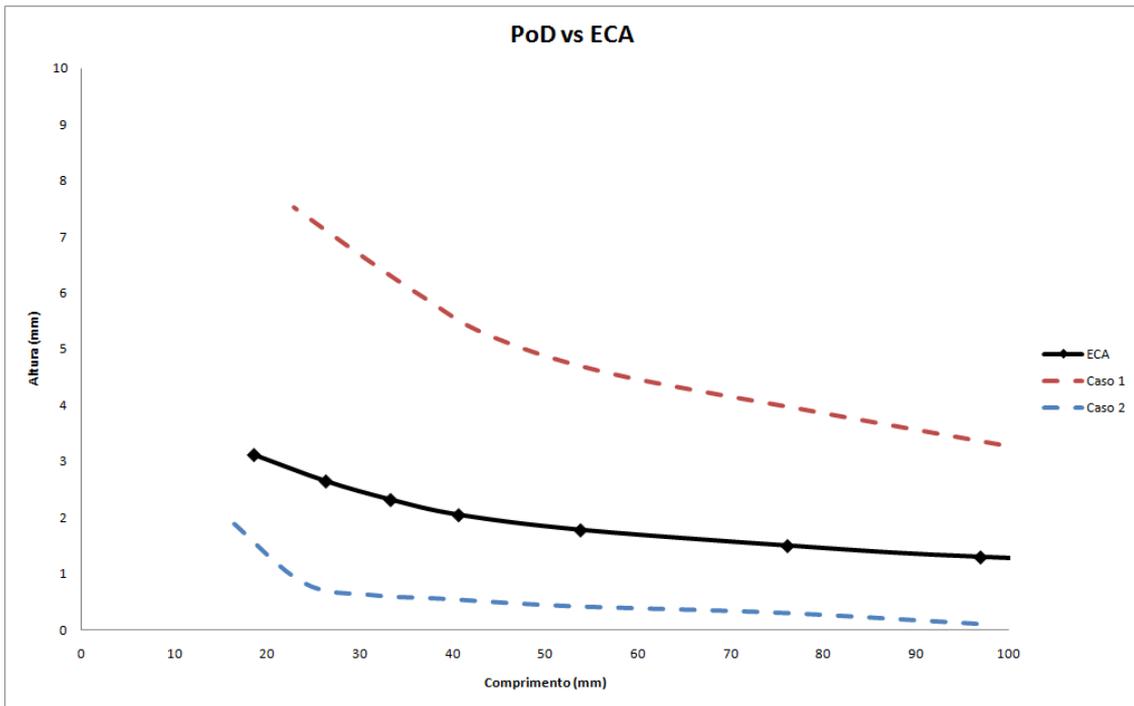


Figura V.16 – Análise de possíveis casos PoD vs ECA

Capítulo VI

Considerações Finais

A distribuição do dimensionamento dos defeitos envolvidos no trabalho não se deu de maneira simétrica, como geralmente ocorre em sistemas automatizados. O objetivo do trabalho foi seguir a norma DNV na análise do erro de dimensionamento e utilizou-se a distribuição normal para definir os limiares de erro aceitáveis. Tal distribuição para o presente trabalho não demonstrou ser a mais indicada, necessitando assim um estudo mais aprofundado para avaliar qual seria a distribuição ideal.

Durante a análise do erro de dimensionamento, utilizou-se com critério de aceitação o dimensionamento do defeito que tivesse dentro dos 68% de confiança, ao contrário da norma DNV que utilizam 95%. Em geral, essas normas são desenvolvidas para ultrassom automatizado, que não é tão dependente do fator humano. Para o caso do ultrassom manual, o erro do inspetor agrava um dimensionamento menos preciso. Além disso, sem os resultados de macrografia, o erro de dimensionamento pode ser ainda maior.

Ao se comparar os tipos de análise de dados para a modelagem PoD, observou-se que a análise *â versus a* passa por um processo de filtragem de sinais de resposta estabelecido pelo dimensionamento. Quando deseja-se utilizar uma filtragem de sinais ou avaliar o dimensionamento, deve-se utilizar que a análise *â versus a*.

Uma possível justificativa para a baixa PoD da falta de penetração deve-se ao fato de um inspetor confundir o sinal do defeito com o sinal da raiz, não registrando assim a presença do mesmo.

No presente trabalho, utilizou-se a metodologia de significância de defeitos (ECA) para tubos de geometria mais próxima possível ao do tubo utilizado nas análises de END. Esse fato ocorreu em função da falta de informação do ECA do corpo de prova. Apesar do ocorrido, o foco era demonstrar que a metodologia funciona e que os resultados obtidos foram coerentes com a realidade.

A metodologia descrita nesse trabalho em avaliar a probabilidade de detecção em função de duas variáveis (comprimento e altura) demonstrou-se ser uma excelente ferramenta no estudo da confiabilidade.

Capítulo VII

Conclusões

Ao final da análise do erro, conclui-se que o erro de sobredimensionamento máximo tolerado foi de 3,82mm, enquanto para o subdimensionamento foi de 27,98mm.

Sendo assim, o resultado da sua probabilidade de detecção acaba apresentando um resultado mais conservador em função a análise *hit/miss*. Esta última demonstrou-se ser muito útil e simples na avaliação de detecção de defeitos.

O fator humano é uma variável que influencia significativamente a probabilidade de detecção. Tal fato foi evidenciado pela comparação dos resultados de quatro inspetores, sendo que a diferença de PoD do mais qualificado para o menos qualificado chegou até 50% para defeitos menores que 10mm. Somente acima de 60mm as curvas convergiram para um único resultado.

As técnicas de ensaios não destrutivos, quando comparadas, apresentam resultados de probabilidade de detecção bem diferentes. A técnica ToFD apresentou o melhor desempenho, seguido do ultrassom automatizado, que apresentou resultados de PoD bem semelhantes ao do ToFD. O ultrassom manual teve resultados um pouco inferiores em função do fator humano. Por fim, a radiografia apresentou o pior resultado na comparação das técnicas, o que é facilmente justificado devido a presença de inúmeros defeitos do tipo falta de fusão. Sabe-se da limitação da técnica em detectar esse tipo tendo em vista que a orientação normal da incidência da radiação dificulta a detecção de defeitos no chanfro da solda.

A última comparação realizada foi quanto ao tipo de defeito. Utilizando a técnica ultrassônica manual, observou-se que a falta de fusão apresentou valores de PoD superior a falta de penetração. Esse resultado deve-se à orientação da falta de fusão, que favorece a reflexão da onda ultrassônica.

Avaliando a sensibilidade do ultrassom manual através de curvas ROC, percebe-se que para um valor de altura maior (4 e 8 mm), o valor de PoD também é maior. Quando analisamos o valor de PFA, os resultados nos mostram que para pontos equivalentes (com o mesmo *threshold*), os valores de PFA são menores para alturas menores (1 e 2 mm). Porém esses valores de PFA deveriam ser maiores para alturas menores devido à possibilidade de se considerar um sinal de ruído perante um defeito de pequena medida.

Quando se avalia a sensibilidade em função do tipo de defeito, observa-se que os valores de PoD são mais elevados em relação aos valores dos defeitos do tipo falta de penetração. Isso pode ser explicado pelo fato que, ser um defeito na raiz da solda, em muitos casos a falta de penetração pode ser confundida com um sinal de raiz. Desta maneira, muitos inspetores não registram a presença desse defeito, apesar de ter encontrado o seu respectivo sinal. Com relação aos valores de PFA e analisando os pontos das curvas que possuem mesmo valores de amplitude, nota-se que os valores de PFA são muito próximos, não apresentando uma diferença significativa.

Através da PoD multivariável para o ensaio ultrassônico manual, constatou-se que o comprimento apresenta uma maior sensibilidade à probabilidade de detecção que a altura. Em outras palavras, pode-se dizer que o comprimento foi a dimensão mais significativa na detecção de defeitos. Esse efeito acaba sendo bastante surpreendente, tendo em vista que a amplitude do sinal está intimamente ligada à altura.

Ao correlacionar os resultados de PoD e ECA, observou-se que nem todos os defeitos admissíveis pela mecânica da fratura são detectados com 90% de PoD, como se encontra em normas e procedimentos. Dessa forma, obteve-se uma região comum as duas análises, isto é, defeitos admissíveis detectados com 90% de PoD. Essa região inicia-se em defeitos com aproximadamente 39,7mm de comprimento e 2,1mm de altura.

Ao final do trabalho, concluiu-se que o estudo de confiabilidade aplicado demonstrou ser muito eficaz para caracterizar o grau de confiança que o sistema apresenta. Foi possível definir vantagens e limitações da técnica, separar a influência de variáveis na inspeção e comparar os resultados obtidos com outras técnicas auxiliares. A correlação de PoD com ECA se mostrou uma avaliação promissora para determinar de uma maneira mais avançada a melhor metodologia na detecção e significância de defeitos.

Capítulo VIII

Trabalhos Futuros

O trabalho apresentado, apesar de ter sido uma primeira abordagem prática do assunto estudado, apresentou resultados bastante satisfatórios do ponto de vista da metodologia aplicada. Todavia, após o término do trabalho, constatou-se que novas abordagens poderiam ter sido realizadas.

O processo de inserção de defeitos artificialmente utilizado demonstrou ser falho do ponto de vista de controle dimensional. Atualmente, estão sendo realizados novos trabalhos relacionados ao estudo da confiabilidade, os quais utilizam a inserção de grafite para simular a presença de defeitos. Os estudos prévios mostram que o controle dimensional dos defeitos apresenta valores mais próximos do projeto que a técnica de inserção de pequenas chapas, como foi visto nesta dissertação.

Nesses mesmos novos trabalhos de confiabilidade, a definição das dimensões dos defeitos a serem inseridos foi realizada antes do início efetivo da inserção. Com isso, obteve-se uma maior escala de tamanho de defeitos, tanto para o comprimento quanto para altura. Tal decisão antes de iniciar um trabalho que vise estudar a confiabilidade de um sistema é primordial para obter resultados mais confiáveis.

A avaliação da sensibilidade do sistema de inspeção através de curvas ROC apresentada nessa dissertação utilizou como *threshold* as curvas de referência DAC. Os resultados obtidos foram satisfatórios, porém um estudo utilizando amplitudes do sinal como corte (40% da amplitude da tela do aparelho, por exemplo) ao invés da curva DAC permite novos pontos de PoD e PFA, gerando um resultado mais refinado. Além disso, a definição de qual seria o melhor *threshold* para o sistema pode ser feita de maneira mais precisa. Esta metodologia está sendo aplicada atualmente em novos trabalhos de análise de sensibilidade.

O estudo do erro de dimensionamento para sistemas manuais, após a avaliação dos resultados apresentados neste trabalho, demonstrou necessitar de uma avaliação mais aprofundada. Para isso, é preciso avaliar as distribuições estatísticas existentes para definir qual seria mais apropriada para uma distribuição de dimensionamento assimétrica.

Neste trabalho, a correlação da PoD com ECA foi realizada utilizando dados de significância de defeitos em corpos de prova diferente dos resultados de confiabilidade.

Tal correlação serviu para introduzir uma metodologia, porém para uma avaliação com melhores resultados, seria necessário obter dados do procedimento ECA do mesmo tubo que foi inspecionado. Para futuros trabalhos, essa metodologia será aplicada visando os resultados de confiabilidade e significância de defeitos para o mesmo corpo de prova.

A correlação PoD e ECA realizada foi dada para valores de 90% de PoD. Fica como objetivo para próximos trabalhos tentar correlacionar a significância de defeitos com 90% de PoD, mas com 95% de confiança, como trabalha a norma DNV.

Referências Bibliográficas

- [1] BARTHOLO, P. U., 2008, *Modelagem da Probabilidade de Detecção do Ensaio Ultrassônico e Avaliação da Influência de Inspetores e Tipos de Defeitos*, Projeto Final, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [2] CARVALHO, A. A., 2004, *Confiabilidade de Técnicas de Ensaio Não Destrutivos na Inspeção de dutos utilizados na Indústria de Petróleo*, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [3] GEORGIU, G. A., 2006, *Probability of Detection (PoD) curves - Derivation, applications and limitations*, Jacobi Consulting Limited for the Health and Safety Executive.
- [4] MEEKER, W. Q., CHAN, V., et al, 2000, “ A Methodology for Predicting Probability of detection for Ultrasonic Testing” *27th Annual Review of Progress in QNDE*, Iowa, Estados Unidos, 2000.
- [5] ANDREUCII, R., 2003, *Ensaio por Ultra-som*, ABENDE, São Paulo, SP, Brasil.
- [6] MODENESI, P. J., 2001, *Soldagem I – Descontinuidades e inspeção em juntas soldadas*, UFMG.
- [7] ALMEIDA, R. M., 2007, *Confiabilidade de Simulação Computacional em Inspeção Radiográfica em Cordões de Solda de Dutos de Aço*, Projeto Final, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [8] MORGAN, L. L., “The Performance of Automated Ultrasonic Testing (AUT) of Mechanised Pipeline Girth Welds”. *8th ECNDT*, Barcelona, Espanha, 2002.
- [9] ECKSTEIN, C. B., JATKOSKI, E., et al., “Inspeção Baseada em Risco Segundo API 581 – Aplicação do API-RBI Software”. *COTEQ*, Salvador, BA, Brasil, 2002.

- [10] API PUBLICATION 581, “Risk Based Inspection – Base Resource Document”, American Petroleum Institute, 2000.
- [11] SILVA, A. B., 2004, *Programa de Inspeção para Ponte Rolante Baseado em Risco*, Dissertação de M. Sc., PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [12] Guidelines for NDE Reability Determination and Description (NT TECHN REPORT 394), Nordtest, Fevereiro 2003;
- [13] EFRON, B., TIBSHIRANI, R., 1993, *An Introduction to the Bootstrap*, Chapman and Hall.
- [14] WALL, M., WEDGWOOD, F. A., BURCH S., “Modeling of NDT Reliability (POD) and applying corrections for human factors”, *Table of Contents ECNDT, session: Reliability and Validation*, Copenhagen, Dinamarca, 1998.
- [15] MEEKER, W. Q., *PoD Tutorial Part I - Dealing with Hit/Miss Data*, Center for Nondestructive Evaluation Department of Statistics Iowa State University.
- [16] CARVALHO, A. A., SAGRILO, L. V. S., SILVA, I. C. e REBELLO, J. M. A., “The PoD Curve for the Detection of Planar Defects Using a Multi-Channel Ultrasonic”, *Insight (Northampton)*, Northampton, v. 44, n. 11, p. 689-693, 2002.
- [17] RUMMEL, W. D., 1982, *Recommended practice for a demonstration of non-destructive evaluation (NDE) reliability on aircraft production parts*, Materials Evaluation Vol. 40.
- [18] MEEKER, W. Q., *PoD Tutorial Part II – Review of what versus a Strategies*, Center for Nondestructive Evaluation Department of Statistics Iowa State University.
- [19] GOLDSTEIN, H., HEALEY, M. J. R., “The graphical presentation of a collection of means”, *Journal of the Royal Statistical Society*, 1995.

- [20] MORETTIN, P. A., BUSSAB, W. O., 2002, *Estatística Básica*, 5ª Edição, São Paulo, SP, Brasil.
- [21] GINZEL E.A., MATHESON M., FEHER B., 2009, *Probability of Rejection*, Canadá.
- [22] FÜCSÖK, F., MÜLLER, C., SCHARMACH, M., “Measuring of the Reliability of NDE”, *The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing*, Eslovênia, 2005.
- [23] STROHAECKER, T.R., *Mecânica da Fratura*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [24] PELLINI, W. S., NRL REPORT 7406, 1972.
- [25] DNV-OS-F101, SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS, DNV, 2007.
- [26] CAMPINHO, H. S., 2007, *Aplicação do Ultra-som Automatizado na Inspeção de Solda Circunferencial em Dutos na Indústria de Petróleo e Gás*, Dissertação de M. Sc., Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, Brasil.
- [27] DNV Report 2003-3381, Qualification of the Oceaneering/OIS – PipeWizard AUT System for the Pipe Girth Welds, 2003.
- [28] REBELLO, J. M. A., CARVALHO A. A., SAGRILO L. V. S., e SOARES S. D., “Reliability of the Ultrasonic Technique Applied to Detection of Pipe Weld Defects”, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 26, 2007.
- [29] Manual do software STATUS version 2.
- [30] MIL-HDBK-1823, 1999, *Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment*, Department of Defense, USA.

- [31] CIORAU, P., GRAY, D., DARKS, W., “Phased Array Ultrasonic Technology Contribution to Engineering Critical Assessment (ECA) of Economizer Piping Welds”, *6th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*, Hungria, 2007.
- [32] AGTHOVEN, R., RAAD, J. A., “Reliability of Mechanised UT Systems to Inspect Girth Welds during Pipeline Construction”, *7th ECNDT*, Copenhagen, Dinamarca, 1998.
- [33] WOLSENHOLME, L. C., 1997, *A Comparison of Models for Probability of Detection (POD) Curves*, Statistical Research Paper No.19.
- [34] CHIODO, M. S. G., 2009, *Procedimento de Avaliação da Integral J e CTOD para Dutos com Trincas Circunferenciais Submetidos à Flexão e Aplicações à Instalação de Risers pelo Método Carretel*, Dissertação de M. Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil.

Anexos

Resultados da inspeção ultrassônica manual

	Inspetor 1							
	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Solda 1	34	25	30	34	60	40	48	40
Solda 2	43	50	44	50	49	55	55	61
Solda 3	34	25	28	30	x	35	x	38
Solda 4	19	40	40	30	36	26	29	33
Solda 8	32	37	22	16	11	45	13	21
Solda 9	58	55	65	58	49	38	55	53
Solda 10	x	34	17	38	35	27	26	x
Solda 11	20	19	40	29	22	13	22	29

Comprimento (mm) medido

	Inspetor 2							
	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Solda 1	18	15	25	30	40	43	62	x
Solda 2	29	33	38	29	41	38	45	39
Solda 3	9	12	15	x	16	x	x	x
Solda 4	15	23	21	18	19	20	28	20
Solda 8	48	33	35	29	30	34	31	30
Solda 9	45	40	45	47	48	89	51	42
Solda 10	18	22	15	19	20	23	21	20
Solda 11	25	17	24	30	29	21	23	23

Comprimento (mm) medido

	Inspetor 3							
	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Solda 1	17	14	26	30	43	43	68	x
Solda 2	32	48	50	44	21	74	18	47
Solda 3	39	37	27	35	x	x	x	27
Solda 4	10	16	16	8	10	8	10	12
Solda 8	53	27	30	18	54	43	25	28
Solda 9	19	36	23	26	55	25	46	35
Solda 10	x	18	29	13	49	16	x	17
Solda 11	15	34	14	20	15	28	26	22

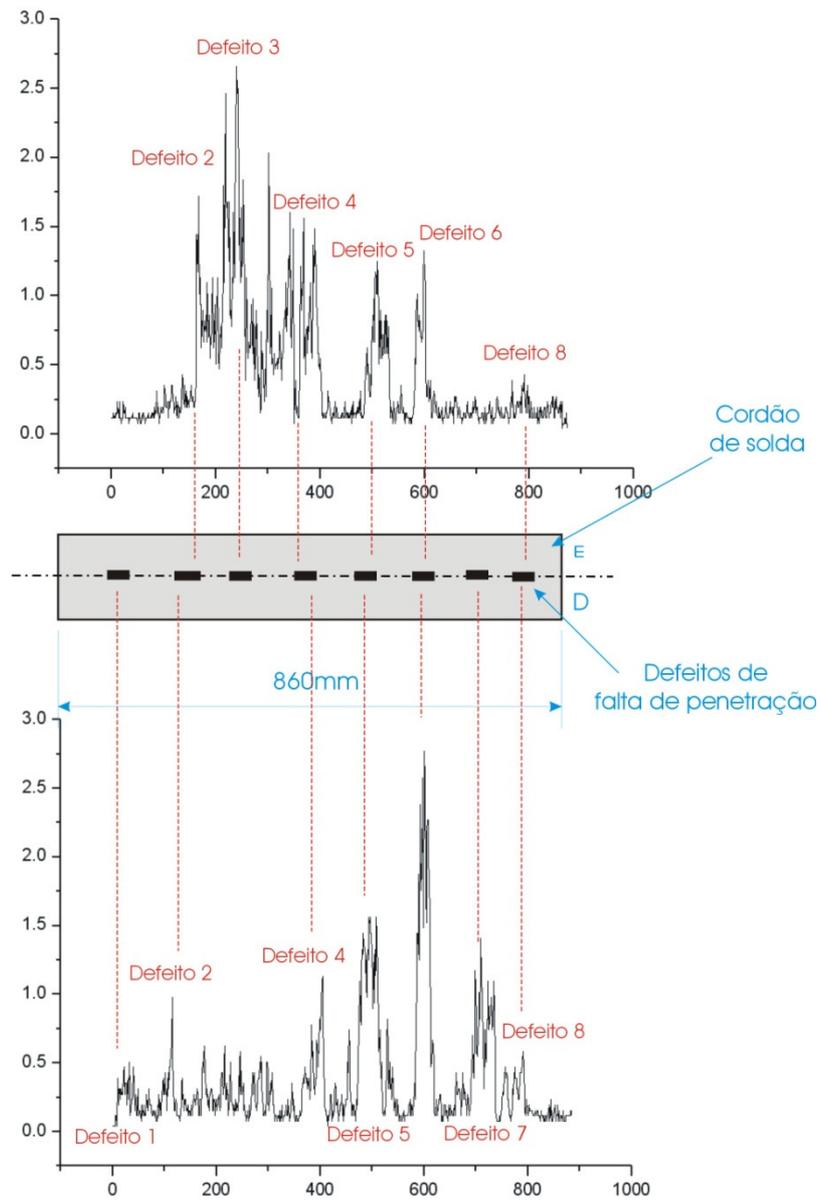
Comprimento (mm) medido

	Pablo							
	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Solda 1	14	8	14	18	16	26	24	20
Solda 2	28	42	34	28	44	24	32	34
Solda 3	x	20	18	x	16	x	22	12
Solda 4	20	28	20	28	24	20	40	30
Solda 8	26	28	22	26	34	30	26	32
Solda 9	30	41	27	28	35	42	26	45
Solda 10	Os cordões 10 e 11 foram cortados							
Solda 11								

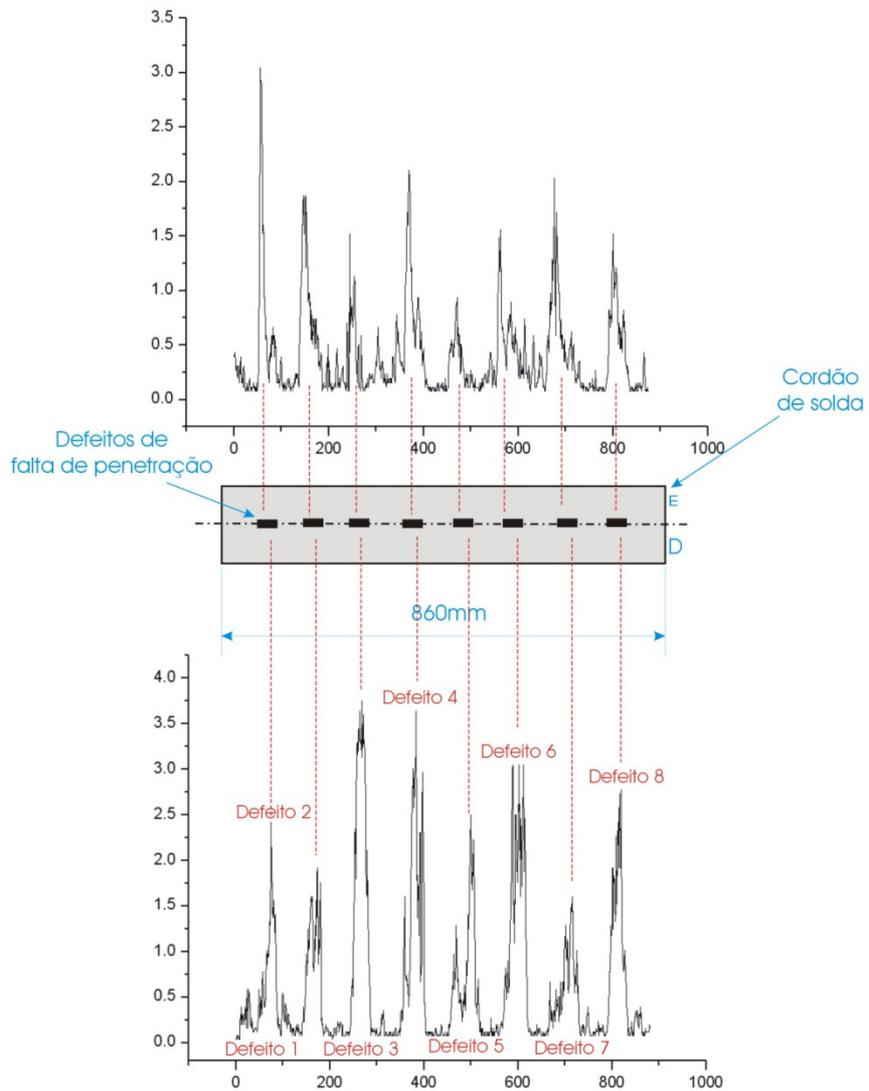
Comprimento (mm) medido

Resultados da inspeção ultrassônica automatizada

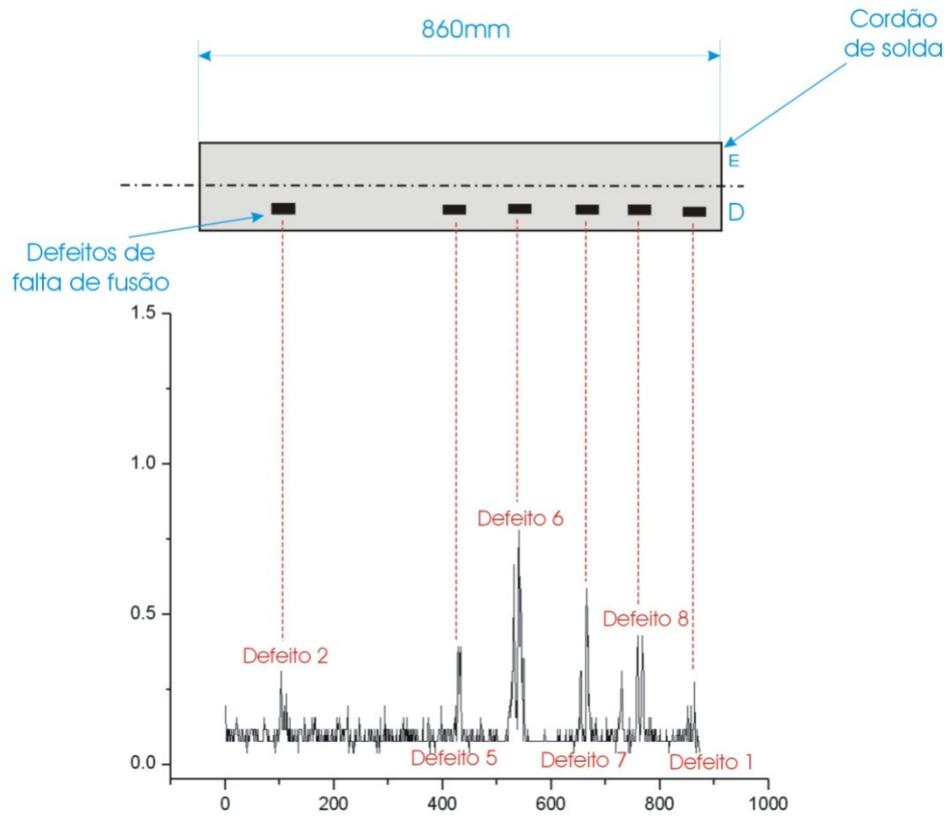
Solda 1 - Inspeção a 34mm
Defeitos de Falta de Penetração



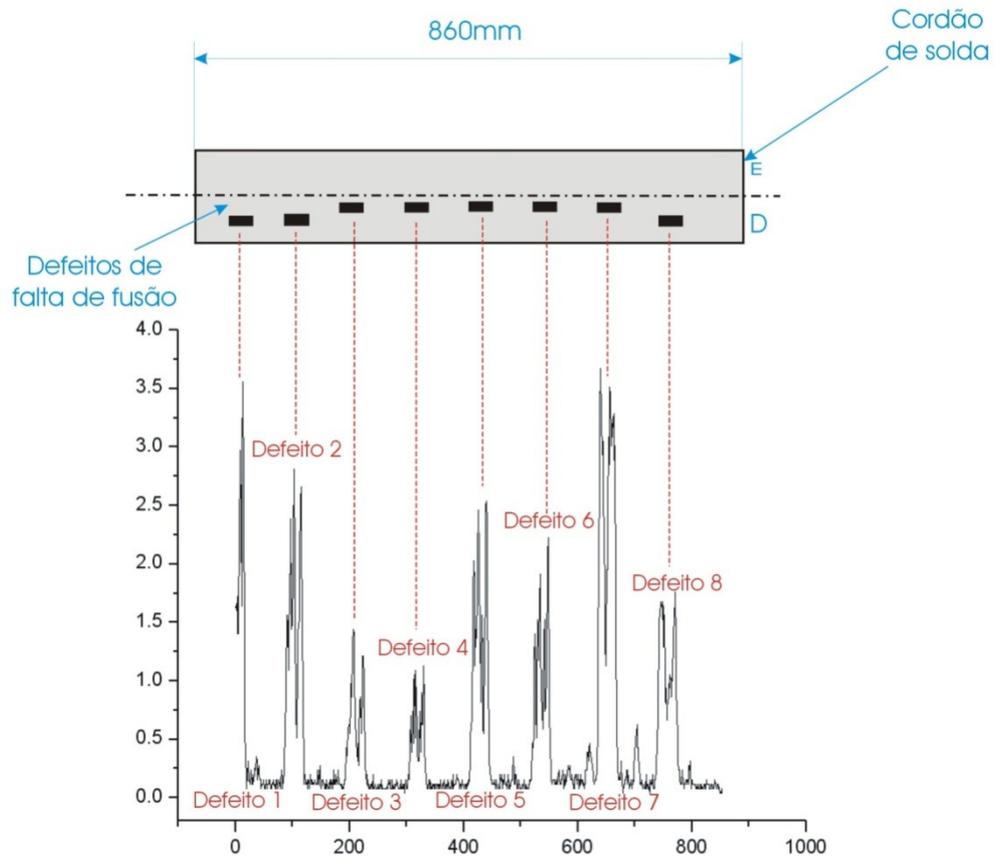
Solda 2 - Inspeção a 34mm
Defeitos de Falta de Penetração



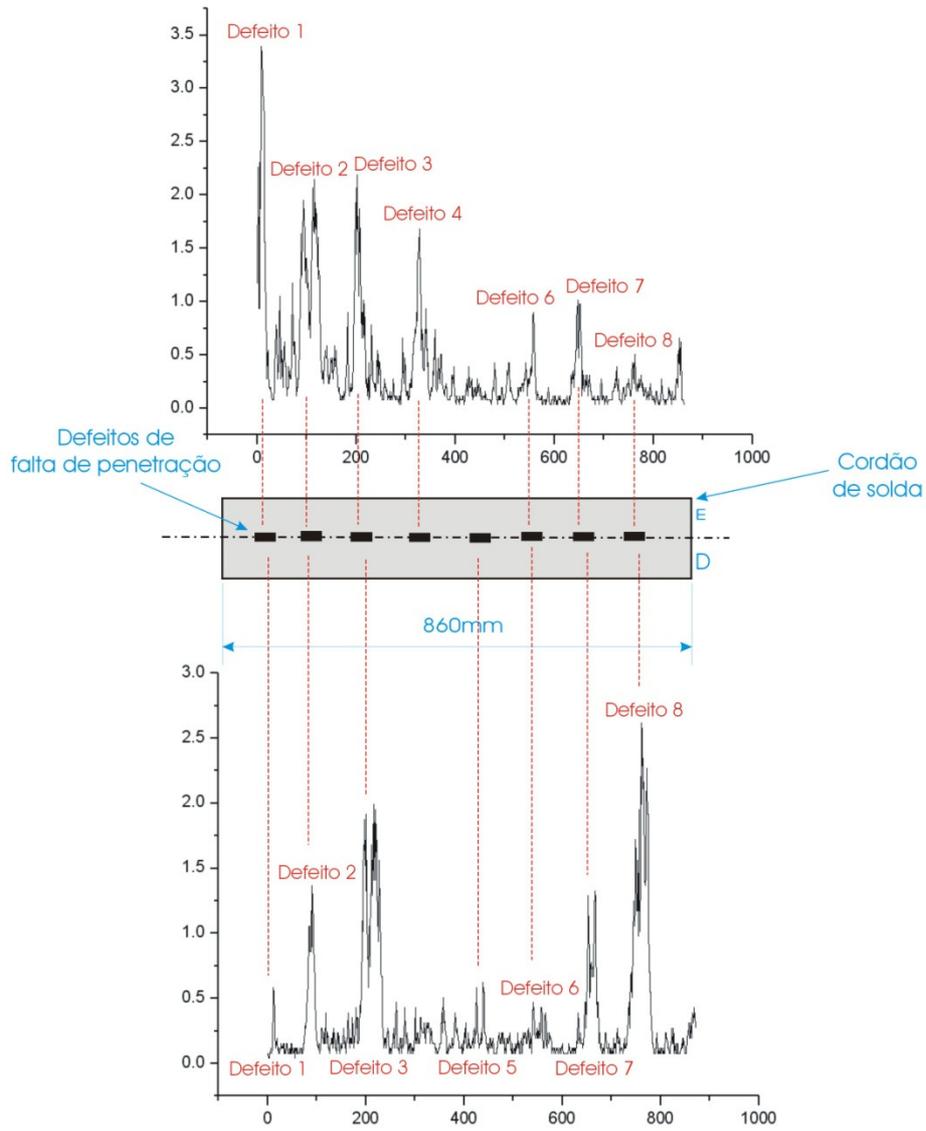
Solda 3 - Inspeção a 50mm - Direita
Defeitos de Falta de Fusão



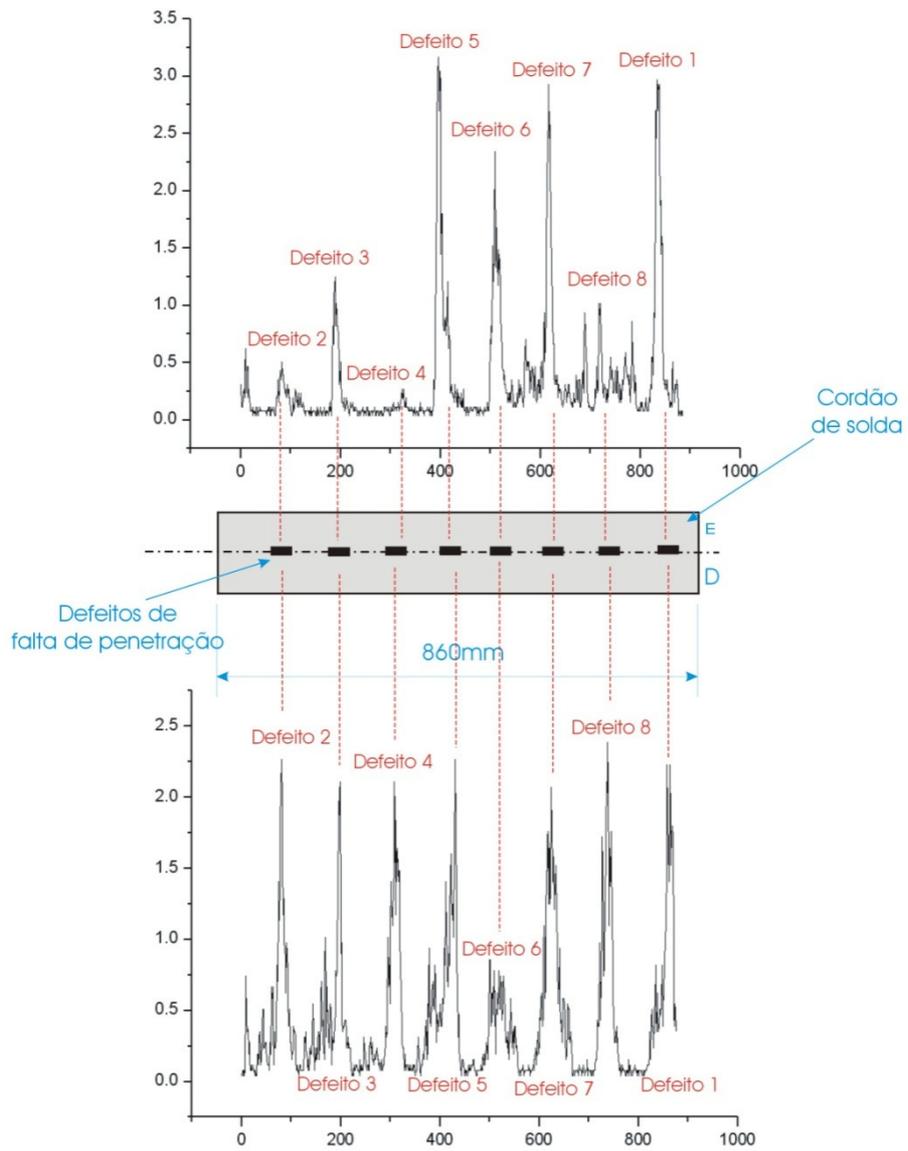
Solda 4 - Inspeção a 50mm - Direita
Defeitos de Falta de Fusão



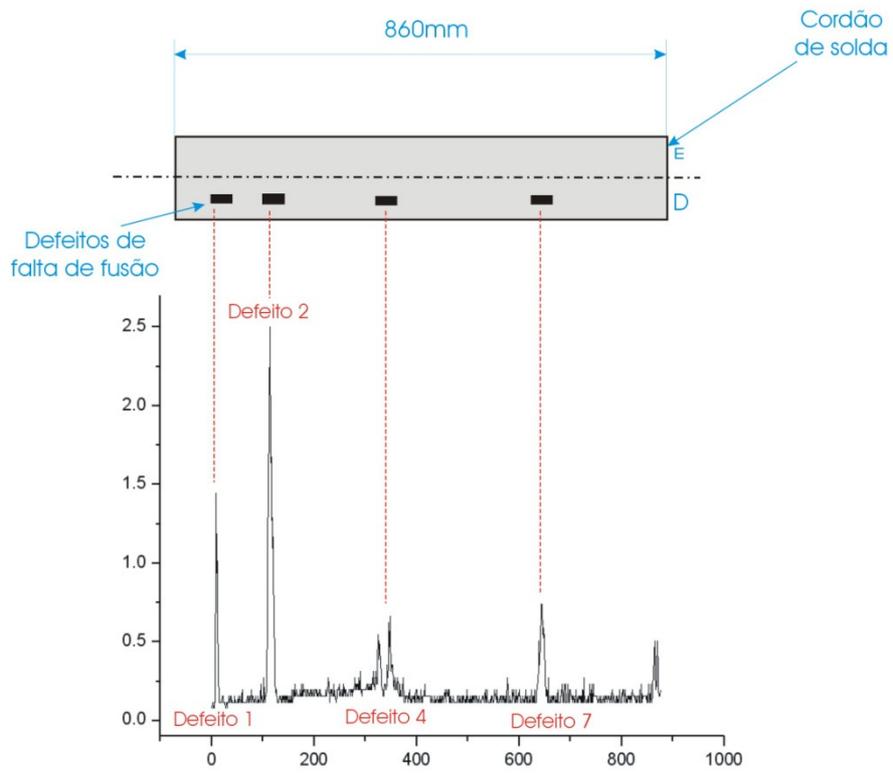
Solda 8 - Inspeção a 34mm
Defeitos de Falta de Penetração



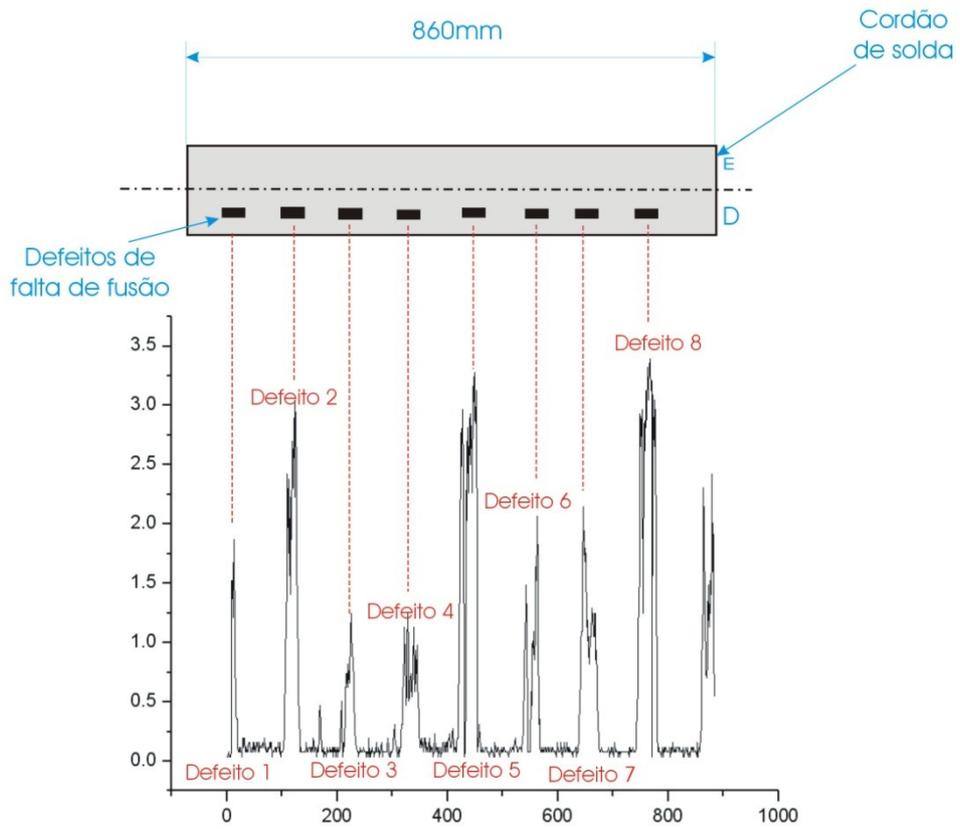
Solda 9 - Inspeção a 34mm
 Defeitos de Falta de Penetração



Solda 10 - Inspeção a 60mm - Direita
Defeitos de Falta de Fusão



Solda 11 - Inspeção a 60mm - Direita
Defeitos de Falta de Fusão



Resultados da inspeção por ToFD

Solda 1 - Defeitos de Falta de penetração								
	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Comprimento (mm)	-	43	50,34	54,69	52,98	34,13	-	-
Altura (mm)	-	2,98	2,79	2,89	2,11	1,15	-	-
Posição (perímetro)	-	137,84	244,78	350,76	460,14	578,93	-	-
Posição (altura)	-	16,02	16,21	15,93	16,89	17,85	-	-

Solda 2 - Defeitos de Falta de penetração								
	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Comprimento (mm)	48,15	71,85	65,55	65,37	64,99	50,37	48,45	49,07
Altura (mm)	4,27	11,18	9,79	11,18	10,52	6,3	5,08	4,75
Posição (perímetro)	35,69	141,42	254,38	359	473,81	588,61	686,82	776,19
Posição (altura)	14,5	7,82	8,88	7,82	8,88	12,86	13,92	14,6

Solda 3 - Defeitos de Falta de fusão								
	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Comprimento (mm)	-	27,09	33	23	14,5	18	15,82	12,87
Altura (mm)	-	4,35	5,42	5,07	4,17	3,8	2,84	3,86
Posição (perímetro)	-	91,73	194	318	426,7	533	642,58	740,52
Posição (altura)	-	8,25	5,36	8,91	7,28	7,95	8,91	8,01

Solda 3 - Defeitos de Falta de fusão								
	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Comprimento (mm)	-	27,09	33	23	14,5	18	15,82	12,87
Altura (mm)	-	4,35	5,42	5,07	4,17	3,8	2,84	3,86
Posição (perímetro)	-	91,73	194	318	426,7	533	642,58	740,52
Posição (altura)	-	8,25	5,36	8,91	7,28	7,95	8,91	8,01

Solda 4 - Defeitos de Falta de fusão								
	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Comprimento (mm)	31,06	37,28	39,78	39,1	31,6	24,5	26,27	33,62
Altura (mm)	5,49	3,08	4,73	3,56	3,38	5,21	4,91	4,14
Posição (perímetro)	842,94	91,17	194,15	299,63	413,52	527,36	631,77	736,73
Posição (altura)	7,15	7,92	6,18	6,38	6,28	6,57	8,02	6,28

Solda 8 - Defeitos de Falta de penetração

	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Comprimento (mm)	48,99	47,79	52,68	51,36	-	46,53	50	49,46
Altura (mm)	3,38	2,31	1,83	2,21	-	1,64	1,63	3,56
Posição (perímetro)	840	77,63	187,6	296,78	-	518,94	622,97	735,18
Posição (altura)	15,63	16,99	17,07	16,99	-	17,66	17,37	15,44

Solda 9 - Defeitos de Falta de penetração

	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Comprimento (mm)	63	83,09	82,11	79,56	71,11	54,77	60,45	53,78
Altura (mm)	9,06	10,21	9,87	10,02	5,3	5	5,3	6,46
Posição (perímetro)	853,16	88,85	200,16	308,93	428,82	530,93	646,03	756,03
Posição (altura)	9,94	8,89	8,98	8,98	13,7	14	13,7	12,64

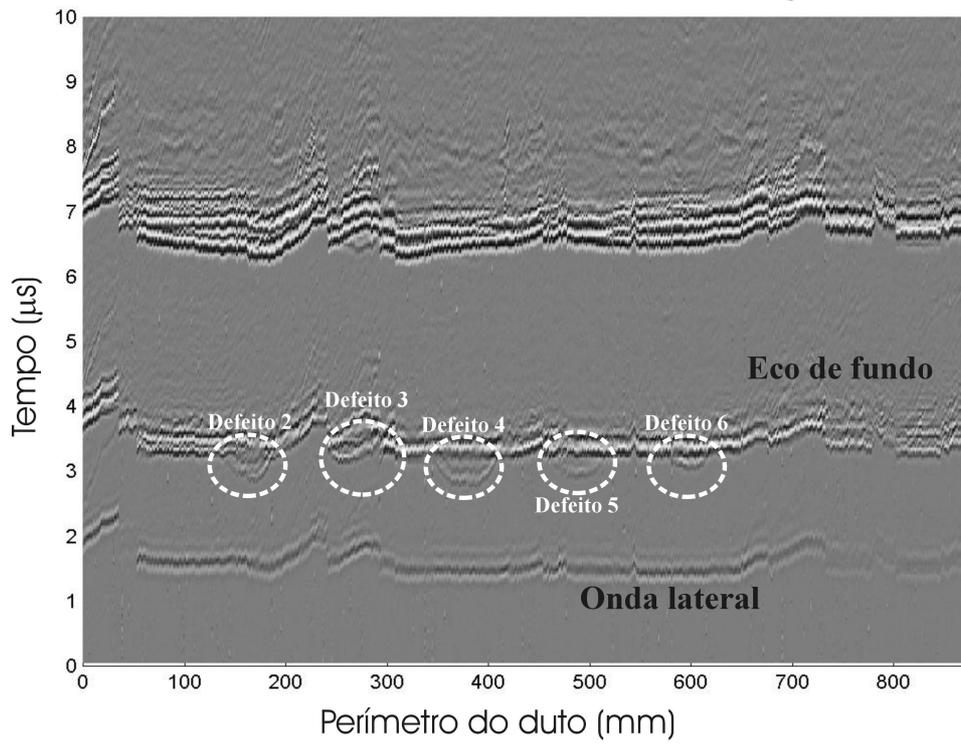
Solda 10 - Defeitos de Falta de fusão

	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Comprimento (mm)	35,18	26,67	26,82	98,48	84,14	33,49	28,05	32,23
Altura (mm)	5,5	5,59	3,87	5,94	5,7	4,81	3,38	4,82
Posição (perímetro)	5,01	53,8	222,62	266,52	432,7	527,09	642	733,68
Posição (altura)	8,3	6,86	5,6	4,3	5,8	5,13	6,86	7,05

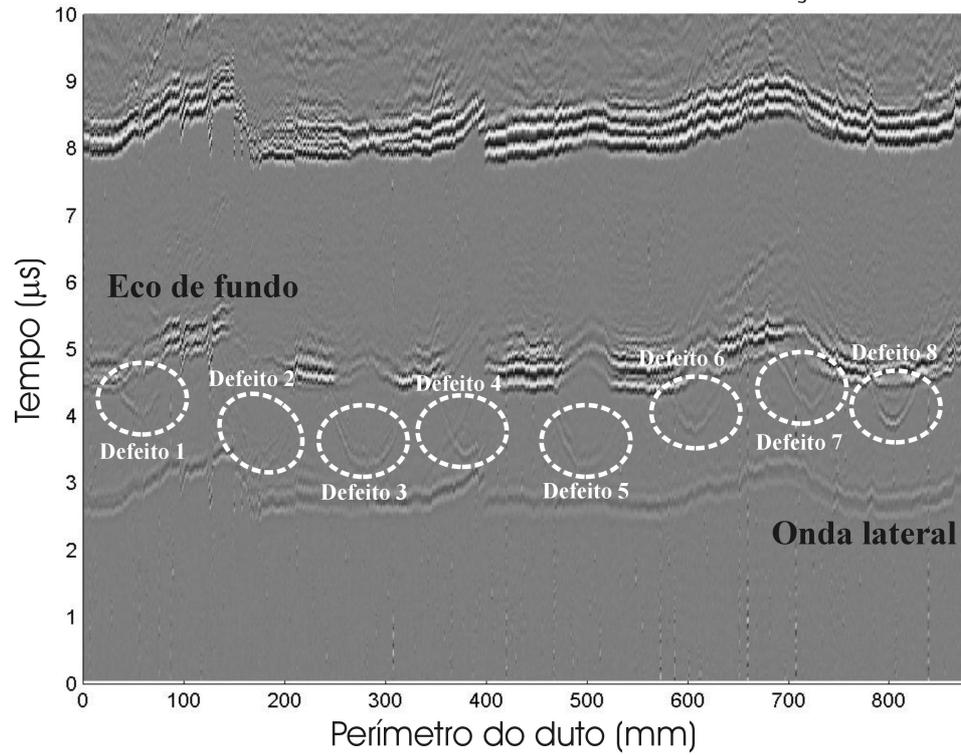
Solda 11 - Defeitos de Falta de fusão

	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
Comprimento (mm)	35,04	24,49	28,47	35,63	62,9	32,63	37,92	40,08
Altura (mm)	4,52	5,4	4,14	4,23	8,6	8,2	8,48	8,96
Posição (perímetro)	0	114,08	214,21	324,9	429,41	540,35	645,35	748,53
Posição (altura)	6,78	7,54	5,13	6,1	5,1	4,26	7,64	6,58

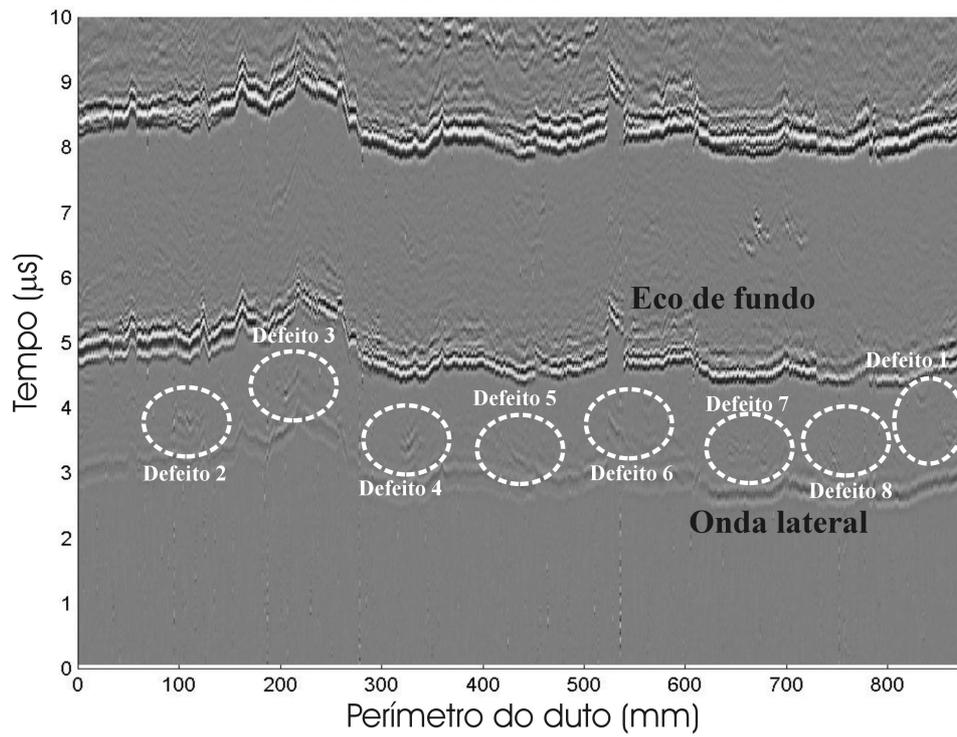
Solda 1 - Defeitos de Falta de Penetração



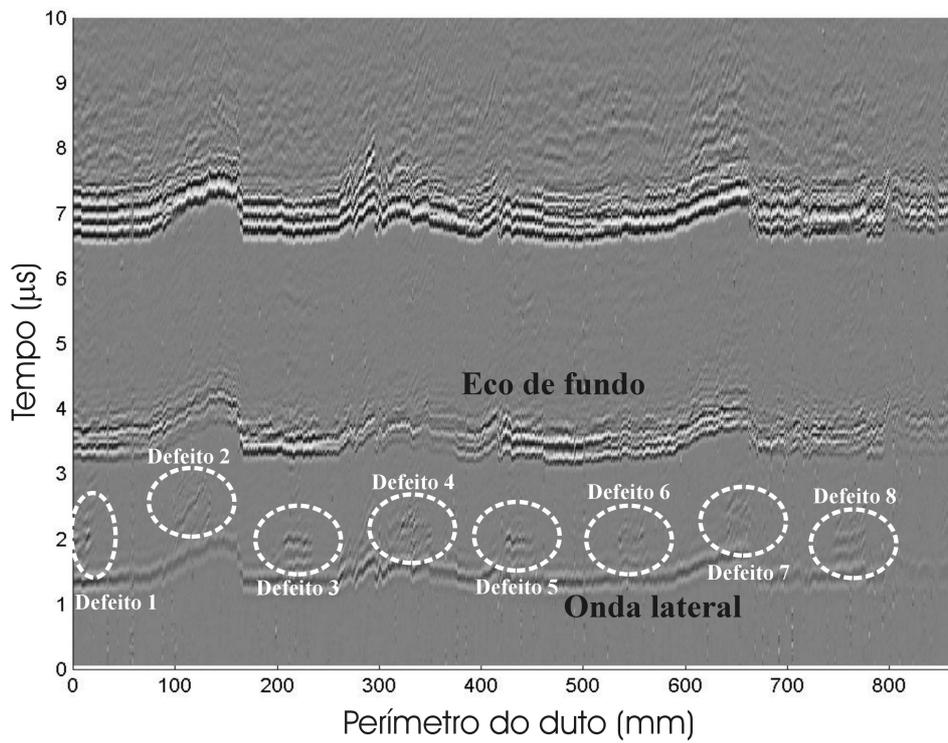
Solda 2 - Defeitos de Falta de Penetração



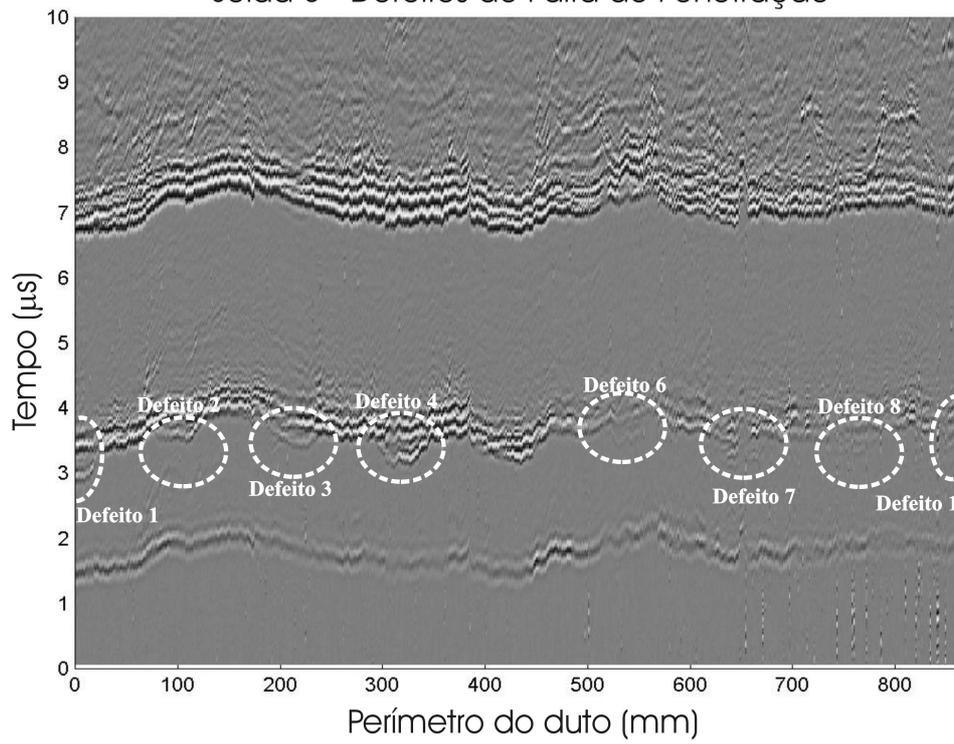
Solda 3 - Defeitos de Falta de Fusão



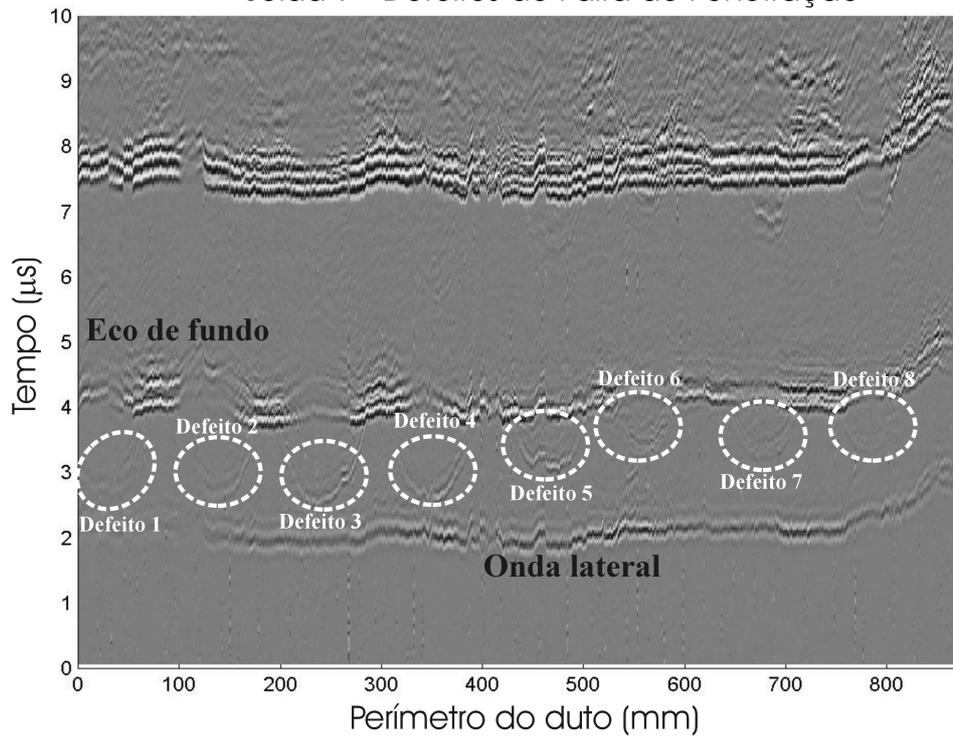
Solda 4 - Defeitos de Falta de Fusão



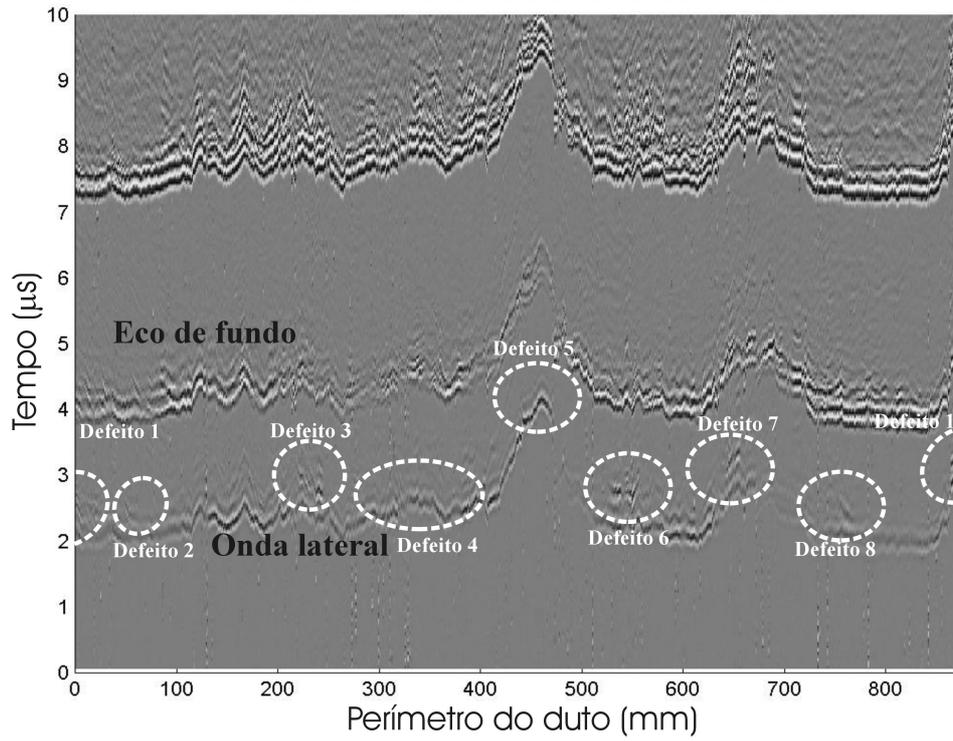
Solda 8 - Defeitos de Falta de Penetração



Solda 9 - Defeitos de Falta de Penetração



Solda 10 - Defeitos de Falta de Fusão



Solda 11 - Defeitos de Falta de Fusão

