



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

DETECÇÃO DE FALHAS EM SOLDAS LONGITUDINAIS POR ULTRASSOM ASSISTIDA POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Fábio Aucar França

Projeto de graduação apresentado ao curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Rio de Janeiro

Março de 2015

**DETECÇÃO DE FALHAS EM SOLDAS LONGITUDINAIS POR ULTRASSOM
ASSISTIDA POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Fábio Aucar França

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE METALÚRGICO.

Examinada por:

Profª. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

PEMM-COPPE/UFRJ - (Orientadora)

Profª. Adriana da Cunha Rocha, D.Sc

PEMM-COPPE/UFRJ

Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D

PEMM-COPPE/UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO de 2015

França, Fábio Aucar

Detecção de Falhas em Soldas Longitudinais por Ultrassom Assistida por Simulação Computacional/ Fábio Aucar França – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

X, 49 p.: il.; 29,7cm

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 48 - 49.

1. Ultrassom. 2. Ensaio Não-Destrutivo. 3. Curvas PoD. 4. Simulação Computacional.

I. Pereira, Gabriela Ribeiro II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica. III. Detecção de Falhas em Soldas Longitudinais por Ultrassom Assistida por Simulação Computacional.

Dedico este trabalho a meus amados pais Márcia e Francisco, minhas irmãs Carolina e Fernanda e meu cunhado Eduardo pelo apoio e incentivo. Dedico também ao amor da minha vida Maiara, que me acompanha todos os dias e me conforta nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à professora Gabriela Ribeiro Pereira, pela orientação, apoio e atenção despendida que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

À Engenheira e amiga Mariana Burrowes, pela orientação, apoio e pela constante disposição em ajudar em todos os momentos. Sua participação e amizade foram imprescindíveis para o sucesso deste trabalho. Mariana, muito obrigado.

Ao professor João Marcos Alcoforado Rebello, por ter me dado a oportunidade de estagiar no LNDC. Tenho enorme gratidão ao senhor por isso, pois foi minha primeira oportunidade profissional.

A todos os colegas do LNDC pela paciência e companheirismo no convívio diário, Foi um lugar onde vivi bons momentos e aprendi muita coisa.

Aos Engenheiros Pablo Uchôa e Rômulo Moreira, com os quais foi um prazer trabalhar em meu primeiro ano de estágio.

Ao professor Luís Marcelo Tavares que me incentivou a olhar além do óbvio para compreender a análise estatística: foi um verdadeiro trabalho de detetive, como ele costuma dizer.

Ao Sr. Marcos Ponciano e à Tenaris Confab por disponibilizar material e pessoal qualificado para a confecção do corpo de prova.

Aos meus grandes amigos do Colégio São Vicente de Paulo, pela amizade desde a infância e àqueles do Metalmat Underground, que se tornaram verdadeiros irmãos e tiveram participação fundamental em minha formação.

Sumário

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 PRINCÍPIOS DO ULTRASSOM	2
2.1.1 - DESCRIÇÃO	2
2.1.2 - ONDAS ULTRASSÔNICAS.....	2
2.1.3 – INTERAÇÃO DA ONDA COM UMA DESCONTINUIDADE	4
2.1.4 - TÉCNICA DO PULSO ECO	5
2.2 CONFIABILIDADE	6
2.3 PROBABILIDADE DE DETECÇÃO	7
2.3.1 - A CURVA POD	7
2.3.2 – PARÂMETROS DA CURVA POD.....	9
2.3.3 - REQUISITOS EXPERIMENTAIS PARA DESENVOLVIMENTO DA CURVA POD	10
2.3.4 – MODELAGEM MATEMÁTICA DA CURVA POD.....	11
2.3.5 – ANÁLISE HIT/MISS	12
2.3.6 - ANÁLISE \hat{A} VS. A	15
2.3.7 – DETERMINAÇÃO DO PATAMAR DE DETECÇÃO	19
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 CORPO DE PROVA.....	22

3.2 – ARRANJO DO SISTEMA DE ULTRASSOM	23
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 - INSPEÇÃO ULTRASSÔNICA.....	27
4.2 - MODELAGEM DAS CURVAS POD	27
4.3 – O SIMULADOR CIVA™.....	36
4.3.1 – DESENHO DO SÓLIDO VIRTUAL.....	37
4.3.2 – INSERÇÃO DOS DEFEITOS VIRTUAIS.....	38
4.3.3 – CONFIGURAÇÃO DOS TRANSDUTORES	39
4.3.4 – APLICAÇÃO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO	39
4.4 – NOVA RODADA DE INSPEÇÕES.....	42
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES.....	46
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico.

Detecção de Falhas em Soldas Longitudinais por Ultrassom Assistida por Simulação
Computacional

Fábio Aucar França

Março/2015

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Curso: Engenharia Metalúrgica

A aplicação de ensaios não destrutivos é de suma importância na verificação da integridade de equipamentos. Diversas técnicas podem ser aplicadas para detectar e dimensionar descontinuidades na superfície e no interior de um material. Entretanto, na maioria das vezes o ensaio não é 100% eficiente, seja por restrição tecnológica ou mesmo por fatores humanos. Desta maneira, muitos projetos de pesquisa vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos propondo estimar a confiabilidade de determinada técnica, o método mais utilizado é a curva PoD (*Probability of Detection*). Neste estudo, será feita uma análise de confiabilidade de um dado sistema de ultrassom automatizado através de curvas PoD obtidas experimentalmente. Posteriormente, com auxílio de um software de simulação de ensaios não destrutivos ocorrerá uma tentativa de aprimoramento do sistema.

Palavras-chave: Ensaios Não Destrutivos, ultrassom, confiabilidade, Curva PoD, simulação computacional.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Engineer.

Flaw Detection on Longitudinal Weld Assisted by Computational Simulation

Fábio Aucar França

March/2015

Advisor: Gabriela Ribeiro Pereira

Course: Metallurgical Engineering

Abstract:

The application of non-destructive testing is very important in the equipment integrity checking. Several techniques can be applied to detect and measure flaws in the surface and interior of materials. However, the efficiency of an evaluation is not always 100%, either by technological restriction or even human factors. Thus, many research projects have been developed in recent years proposing estimate the reliability of certain technique, the method most used is the PoD curve (Probability of Detection). The purpose of the present study is to evaluate the reliability of an automatic ultrasound system through PoD curves modelling, and for that, an API X65 pipe was used as sample and it contained on its longitudinal weld different sizes and shapes of graphite pieces in representing real defects. After a number of inspections, changes in the initial system configurations were suggested by the non-destructive testing simulation software CIVA. In the end, the reliability study was accomplished and improved based on computational simulation.

Keywords: Non destructive testing, ultrasound, reliability, PoD curve, simulation.

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são ferramentas essenciais na avaliação da integridade de produtos e equipamentos em diversos setores como petróleo, petroquímico, siderúrgico, aeroespacial, naval e outros. Aplicando técnicas de END é possível detectar e dimensionar descontinuidades presentes tanto na superfície como no interior de um material, sem alterar suas propriedades. Os ensaios podem ser por ultrassom, correntes parasitas, radiografia, termografia, partícula magnética, líquido penetrante, emissão acústica, ensaio visual, entre outros. A escolha de um determinado ensaio depende de características como a natureza do material, suas dimensões, tipo de superfície do material (lisa ou rugosa), provável tipo de defeito, posição do defeito (superficial ou interno), entre outros.

A confiabilidade de detecção de uma descontinuidade para diferentes técnicas de END pode ser determinada através de curvas PoD (*Probability of Detection*) [1]. A curva é construída a partir dos resultados de inspeções experimentais, por exemplo, onde a probabilidade de detecção varia de acordo com a dimensão da descontinuidade que pode ser o comprimento, altura, área, profundidade, ou qualquer combinação das anteriores. O valor máximo encontrado é referente a 100% e o valor mínimo é referente a 0%, ou seja, a dimensão em que a descontinuidade não é detectada nenhuma vez.

O objetivo deste trabalho é avaliar a confiabilidade na detecção de defeitos de sistema de ultrassom automatizado através da modelagem da curva PoD e, para tanto, foi utilizado como corpo de prova um tubo de especificação API X65 contendo grafites representando variados tipos de defeitos e de dimensões variadas, inseridos artificialmente em diferentes regiões da junta soldada. Após sucessivas inspeções, fez-se necessário propor adequações nas configurações iniciais através do software de simulação de ensaios não destrutivos CIVA. Ao final do presente estudo, a análise de confiabilidade do sistema foi realizada e, aplicando modificações sugeridas computacionalmente, a mesma pôde ser sensivelmente melhorada.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRINCÍPIOS DO ULTRASSOM

2.1.1 - DESCRIÇÃO

O ensaio por ultrassom é um método não destrutivo no qual um feixe sônico de alta frequência (a partir de 20 kHz) é introduzido no material que se deseja inspecionar. O som percorre o interior do material até encontrar uma interface, na qual ele reflete, tornando possível detectar e localizar discontinuidades presentes no interior do material. O sinal oriundo da reflexão do feixe sônico é mostrado na tela do aparelho de ultrassom, como mostrado na Figura 2.1.

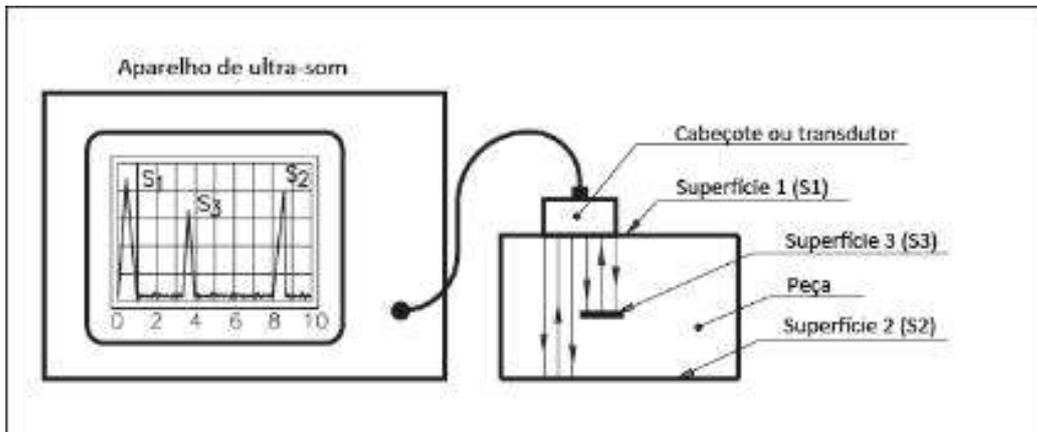


Figura 2.1 - Modelo de Inspeção Ultrassônica [2]

Quando comparado a outros métodos não destrutivos, o ensaio por ultrassom apresenta vantagens tais como elevado poder de penetração, o que torna possível a detecção de discontinuidades em grandes profundidades; alta precisão na determinação da posição e dimensionamento de discontinuidades, além de alta portabilidade [2].

2.1.2 - ONDAS ULTRASSÔNICAS

As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que se propagam em meios elásticos, isto é, em materiais com capacidade de se deformar ao sofrer um esforço e voltar à forma original após o esforço ser retirado. A velocidade de propagação da onda depende do meio em que a onda se propaga e elas podem ser classificadas em três categorias:

- Ondas longitudinais: as partículas do meio oscilam na direção de propagação da onda acústica, como pode ser observado na Figura 2.2. Essas ondas propagam-se nos meios sólidos, líquidos e gasosos.

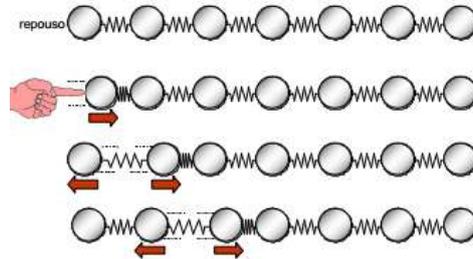


Figura 2.2 - Ondas longitudinais [3].

- Ondas transversais: as partículas oscilam na direção perpendicular ao da direção de propagação da onda acústica. Assim como as ondas longitudinais, essas propagam-se nos meios sólidos. A distância entre os planos de partículas não varia e sua movimentação será somente na vertical, como mostra a figura 3.3.

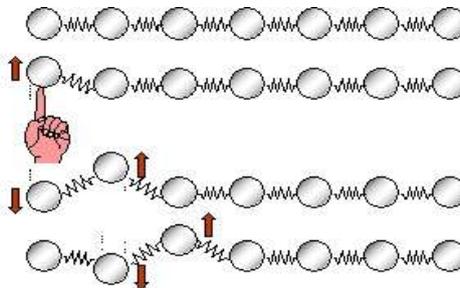


Figura 2.3 - Onda transversal [3].

- Ondas superficiais: a onda acústica nesse caso se propaga na superfície dos sólidos. Um exemplo de sua aplicação é a inspeção de materiais usados como revestimento de outros, pois apresentam baixa espessura [3].

As ondas ultrassônicas são transferidas ao material através de transdutores que, normalmente, são protegidos por material polimérico (sapatas). Esse transdutor contém um cristal de material piezelétrico que tem a capacidade de se contrair e se expandir continuamente quando submetido a uma diferença de potencial de fonte pulsada (DDP).

Esse cristal não volta à posição inicial depois de submetido à DDP, mas fica continuamente vibrando em torno de uma posição de equilíbrio. Essas vibrações geram ondas sonoras que funcionam como pequenas “pancadas” na rede cristalina do material. Essas ondas propagam na estrutura do material e quando encontram seu limite físico (final da peça) retornam ao transdutor que as recebe e esse pulso é registrado.

2.1.3 – INTERAÇÃO DA ONDA COM UMA DESCONTINUIDADE

Quando a onda ultrassônica atinge uma descontinuidade no material na qual ela percorre, esta pode ser refletida, difratada ou transmitida, dependendo do comprimento de onda e tamanho da descontinuidade. Além desses fenômenos, ocorrem conversões de modo de ondas, isto é, a onda passa de um modo de propagação para outro, como por exemplo, muda do modo longitudinal para o transversal ou vice-versa, conforme o ângulo de inclinação do transdutor [4, 5, 6]. A figura 2.4 mostra uma representação da interação de uma onda ultrassônica com um defeito linear.

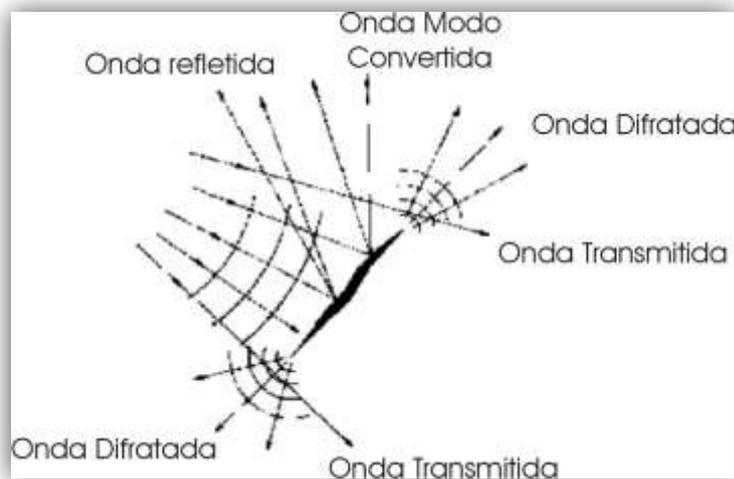


Figura 2.4 – Interação da onda com a descontinuidade [4].

2.1.4 - TÉCNICA DO PULSO ECO

A técnica ultrassônica utilizada com mais frequência em inspeções é a técnica do pulso-eco, devido sua eficiência e fácil aplicação. Esta técnica consiste em detectar discontinuidades presentes no interior do material inspecionado através da reflexão do sinal ultrassônico causada pela diferença de propriedade acústica apresentada entre a discontinuidade e o material. Neste caso, utiliza-se um transdutor emissor-receptor, ou seja, o mesmo transdutor que emite a onda é responsável por receber o sinal de resposta e mostrar o resultado no aparelho. Através deste método é possível detectar, localizar e dimensionar defeitos internos. Uma vez detectado, sua localização pode ser estimada considerando-se o tempo de percurso do feixe sônico entre o pulso inicial e o eco da discontinuidade, tornando possível calcular a distância entre a saída do feixe sônico e o defeito a partir do ângulo de incidência do feixe [7]. Um exemplo de inspeção ultrassônica através da técnica pulso-eco em um cordão de solda pode ser observado na Figura 2.5.

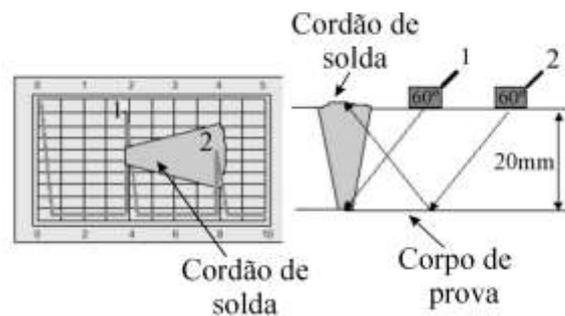


Figura 2.5 – Inspeção no cordão de solda [7].

O tamanho do defeito está diretamente relacionado com a amplitude do sinal refletido, pois quando o pulso ultrassônico encontra uma superfície refletora, parte ou toda energia é refletida. Quanto maior a superfície de reflexão do defeito, maior é o percentual de energia que retorna ao transdutor, aumentando a amplitude do sinal de resposta [8].

A escolha do ângulo de incidência do transdutor também é um fator importante na inspeção, uma vez que a orientação do defeito em relação ao feixe sônico interfere na reflexão da onda. Sendo assim, uma discontinuidade orientada perpendicularmente

em relação à direção do feixe central do transdutor proporciona um sinal de resposta com maior amplitude, favorecendo a detecção pelo inspetor. A figura 2.6 mostra um exemplo de transdutor angular, com feixe sônico emitido a 45° em relação à superfície.

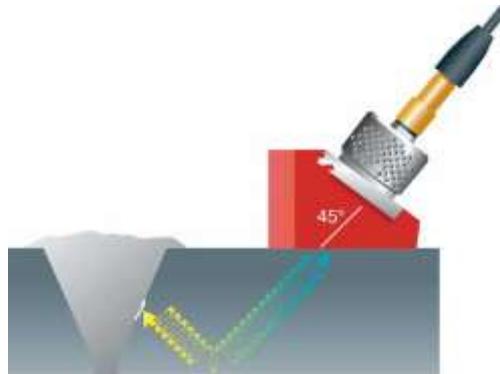


Figura 2.6 – Exemplo esquemático de um transdutor do tipo angular [8].

2.2 CONFIABILIDADE

Os ensaios não destrutivos podem contribuir com importantes informações sobre condições de operação e presença de defeitos em componentes e estruturas usados em diferentes áreas da engenharia. No entanto, em certos casos o diagnóstico não é feito com exatidão e, com isso, defeitos críticos nem sempre são detectados, podendo colocar em risco o funcionamento do sistema avaliado.

A necessidade de se conhecer melhor e quantificar a confiabilidade dos ensaios permitiu avaliar a importância de cada método de inspeção, além de servir como ferramenta para melhorar a eficiência da técnica [9].

Ao realizar um ensaio, diversos fatores podem influenciar na avaliação correta quanto à presença ou não de descontinuidades. Para diferentes inspeções de uma mesma descontinuidade podemos ter diferentes sinais de resposta. Variações momentâneas na calibração do equipamento, propriedades do material, geometria e orientação dos defeitos são fatores que podem levar a uma interpretação errônea dos resultados. A falha humana é também um parâmetro que interfere na confiabilidade do

ensaio. A avaliação do inspetor sob estresse após horas de trabalho em ambiente ruidoso certamente não é semelhante à avaliação do mesmo em situação oposta. Todos esses fatores contribuem para incertezas na inspeção e permitem uma caracterização probabilística da capacidade da inspeção [7,10].

2.3 PROBABILIDADE DE DETECÇÃO

2.3.1 - A CURVA POD

Um dos métodos mais utilizados para quantificar a confiabilidade de uma determinada técnica de ensaio não destrutivo é a curva de probabilidade de detecção ou PoD (*Probability of Detection*). A curva PoD fornece informações sobre a sensibilidade da técnica em função da dimensão da descontinuidade, ou seja, ela mostra a probabilidade de detectar um defeito de acordo com sua dimensão para uma técnica específica que, no caso deste trabalho foi o ultrassom.

Repetidas inspeções de um mesmo tamanho de descontinuidade ou de um mesmo tipo, não necessariamente proverão dados consistentes para uma análise de detecção/não detecção. Pode ser que, mesmo mantendo o tipo de descontinuidade e parâmetros experimentais, algumas inspeções as detectem e outras não. Por isso faz-se necessária uma abordagem estatística da probabilidade de detecção daquela classe de defeito admitindo sempre um intervalo de confiança associado à probabilidade de detecção.

Desta forma, não é de se admirar que curvas PoD têm sido objeto de estudo no que diz respeito à sua aplicação como ferramenta para descrever a confiabilidade de determinada técnica de inspeção. Visando assegurar a integridade estrutural de equipamentos e componentes inspecionados, à luz da mecânica da fratura, é mais interessante perguntar qual a maior dimensão de descontinuidade não detectada por determinada técnica de inspeção ao invés de perguntar qual a menor dimensão detectada por ela.

No exemplo ilustrado na Figura 2.7, duas chapas de alumínio foram inspecionadas através de ultrassom e continham 311 defeitos simulando trincas de

fadiga e apresentavam diferentes alturas [11]. Os defeitos foram registrados da seguinte forma: se detectada pela técnica de inspeção, a descontinuidade era classificada como hit e valor de PoD=1. Caso não houvesse detecção da descontinuidade, recebia o rótulo de miss e PoD=0.

Ainda em relação à Figura 2.7, pode-se observar três regiões distintas separadas pelas linhas a_{maior} e a_{menor} . A linha a_{menor} refere-se à menor dimensão de defeito detectado enquanto que a_{maior} refere-se a maior dimensão de descontinuidade não detectada. A região compreendida entre esses dois valores de dimensão mostra que há defeitos de mesmo tamanho que hora são detectados e hora não são. Sendo assim, claro está que a necessidade de controlar minimamente a confiabilidade de técnicas não destrutivas é de suma importância para integridade de materiais como um todo. E o uso de curvas PoD para adquirir tal controle vem conquistando espaço em todas as áreas industriais [11].

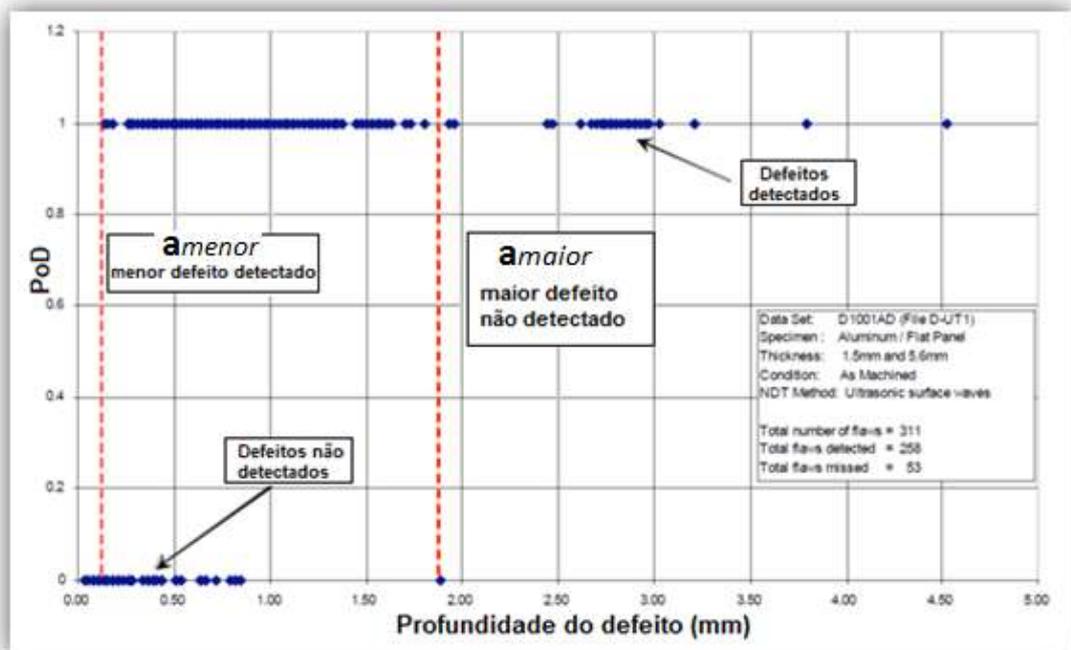


Figura 2.7 – Ilustração de dados *hit/miss* adquiridos por técnica ultrassônica evidenciando a diferença entre a dimensão da menor falha detectada e a maior não detectada [11].

Para uma determinada técnica de inspeção, a PoD ideal para defeitos menores que um tamanho crítico é zero, enquanto a PoD para algum defeito maior que este

tamanho é igual a 100%. Contudo, curvas PoD construídas a partir de ensaios reais, ou seja, dados experimentais, não são tão discriminatórias como a curva ideal e, com isso, defeitos acima do tamanho crítico podem não ter probabilidade de detecção igual a 100%, como pode ser observado na Figura 2.8 [12]

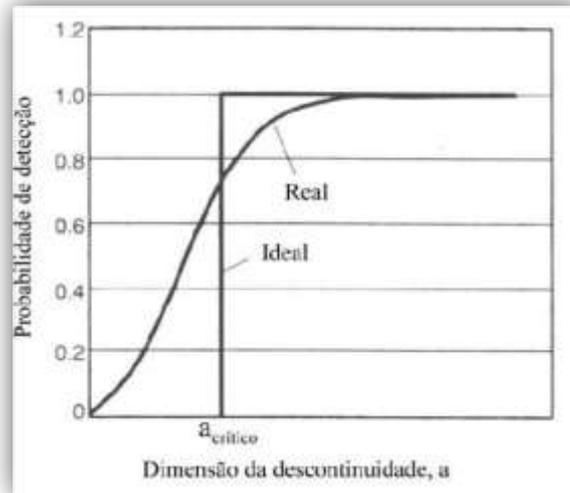


Figura 2.8 – Curva PoD para situações real e ideal [12].

2.3.2 – PARÂMETROS DA CURVA POD

Os parâmetros típicos da curva PoD que a caracterizam de forma eficiente são os valores de dimensão chamados: a_{50} , a_{90} e $a_{90/95}$. O valor de a_{50} representa o valor de dimensão que corresponde a 50% de detecção. Isto é, naquela determinada dimensão, o defeito possui 50% de chance de ser detectado. Da mesma forma, o valor de a_{90} representa o valor de dimensão que possui 90% de chance de ser detectado. E, por fim, $a_{90/95}$ corresponde ao valor de dimensão que possui 90% de chance de ser detectado com 95% de confiança [13].

Normalmente usa-se um intervalo de confiança de 95% para curvas PoD traçadas pelo método estatístico de *Hit/Miss* (ver Figura 2.9). De fato, os parâmetros que realmente fornecem informações sobre a confiabilidade do sistema são os valores de a_{90} e $a_{90/95}$, como será visto adiante.

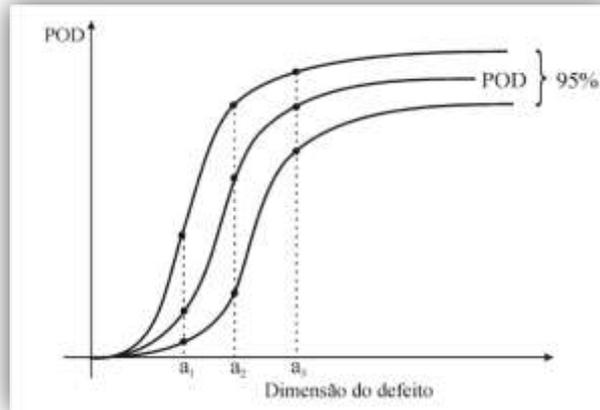


Figura 2.9: Curva de PoD com intervalo de confiança de 95% [13].

2.3.3 - REQUISITOS EXPERIMENTAIS PARA DESENVOLVIMENTO DA CURVA POD

A prática recomendada para o desenvolvimento das Curvas PoD foi originalmente preparada pela indústria aeronáutica e proporcionava uma informação completa na sequência experimental de eventos para gerar a curva e validar o ensaio não destrutivo ou o procedimento adotado.

A sequência de eventos pode ser resumida nos seguintes passos [14]:

- Produzir ou obter defeitos com um número relevante de tamanhos de defeitos 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, era necessário tomar as seguintes decisões cruciais [14]:

- 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 proporcionava uma informação crítica necessária na escala de tamanhos de defeitos para cada intervalo a fim de demonstrar a desejada curva PoD, juntamente com o apropriado “limite de confiança inferior”. Seguindo o procedimento experimental acima, a abordagem deverá conduzir para o menor tamanho de defeito que pode ser detectado com a curva PoD e o seu limite de confiança [14].

É importante notar que a seleção da escala de tamanhos pode gerar dois problemas. O primeiro é que a escala de tamanhos é grande o suficiente para obter a curva PoD juntamente com seu limite de segurança. O segundo, está relacionado ao fato da escala tem que ser grande o suficiente para poder computar os parâmetros estatísticos associados com a curva PoD e gerar informações compatíveis com os dados que se possui. Essa distinção nem sempre é clara na literatura [14].

2.3.4 – MODELAGEM MATEMÁTICA DA CURVA POD

Para modelar uma curva PoD, duas análises podem ser realizadas: **\hat{a} versus a** e ***hit/miss***. A análise *hit/miss* é uma técnica simples e pode ser utilizada em casos onde o método de inspeção emite sinal de resposta apenas quando algum defeito é detectado. Na análise \hat{a} versus a , o sinal de resposta (\hat{a}) está relacionado com o tamanho real do defeito (a), isto é, defeitos de diferentes tamanhos resultarão em sinais com diferentes amplitudes. Esta análise produz um sinal de resposta escalar que é função da dimensão do defeito e permite extrair informações mais específicas a respeito do método de inspeção [15].

Como já é sabido, as técnicas de ensaios não destrutivos não são perfeitas e cada vez mais se torna comum a prática de quantificar a confiabilidade de uma descontinuidade em termos da probabilidade de detecção (PoD) e da probabilidade de falso alarme (PFA). A medição experimental dessas probabilidades é dispendiosa e

possui parâmetros estatísticos de baixa qualidade. Com isso, surge a modelagem matemática como uma ferramenta de desenvolvimento da curva PoD.

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.

A vantagem de utilizar a modelagem matemática é que estudos de parâmetros podem ser feitos de forma simples e barata, otimizando a inspeção a ser realizada. Além disso, o uso do modelo traz como vantagem o fato de existir muito poucos dados sobre probabilidade de falso alarme e o modelo acaba sendo a única forma de se obter esses dados [16].

Em relação à 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 . Os resultados desses ensaios são somente registrados em termos de se o defeito foi detectado ou não, como vimos na figura 2.11. 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.

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 ultrassônicos, 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).

2.3.5 – ANÁLISE HIT/MISS

Neste tipo de análise, iremos considerar que toda detecção vai entrar no desenvolvimento da curva PoD, ou seja, caso o operador detecte um defeito ele será denominado como hit e os que não forem detectados serão denominados como miss. Desta forma, temos que um defeito detectado terá $PoD(a) = 1$, enquanto o defeito não detectado terá $PoD(a) = 0$, como pode ser observado no exemplo da Tabela 3.1 [17].

Tabela 2.1 – Dados hit/miss [17]

Número da amostra	Detectável?	Comprimento da trinca
1	0	0.0125
2	1	0.032
3	0	0.0075
4	0	0.016
5	1	0.025
6	0	0.0096
7	0	0.0215
8	0	0
9	1	0.038
10	0	0.0125
11	0	0.0085
12	1	0.021
13	1	0.028
68	1	0.036
69	1	0.0205
70	0	0.012

Como exemplifica a tabela acima, todos os defeitos apresentaram os valores 1 (detecção) ou 0 (não-detecção). Na amostra de número 8, não havia a presença de um defeito. A inspeção comprovou a ausência do defeito e por isso temos que $PoD(a) = 0$. A Figura 2.10 apresenta um gráfico onde os dados dos defeitos detectados e não detectados estão presentes em função do critério adotado. A curva que une o menor defeito detectado com o maior defeito não detectado é a curva PoD. Vale lembrar que no eixo das abscissas, os valores referentes ao tamanho de defeito estão em escala logarítmica [17].

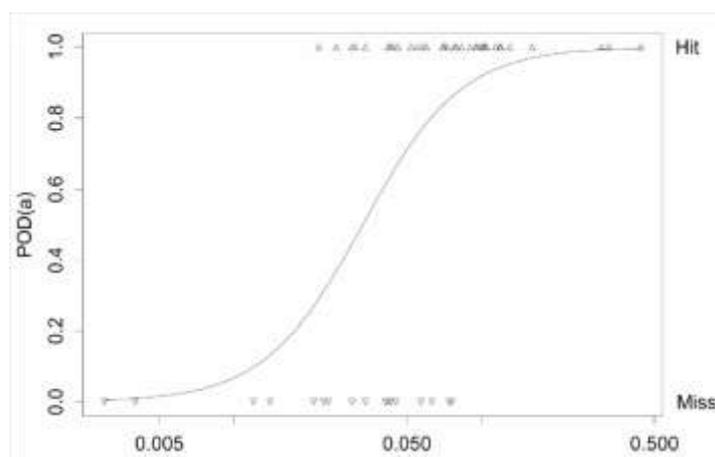


Figura 2.10 – Curva PoD para análise hit/miss [17].

Para desenvolver a curva PoD pela análise hit/miss, alguns modelos foram propostos, porém todos eles apresentam a mesma metodologia. A seguir, serão apresentadas algumas equações para a modelagem:

$$\text{Equação 2.1: } PoD(a) = \frac{e^{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{\ln a - m}{\sigma} \right)}}{1 + e^{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{\ln a - m}{\sigma} \right)}} \quad [16]$$

$$\text{Equação 2.2: } PoD(a) = \frac{e^{\left(\frac{\log a - m}{\sigma} \right)}}{1 + e^{\left(\frac{\log a - m}{\sigma} \right)}} \quad [17]$$

$$\text{Equação 2.3: } PoD(a) = \phi\left(\frac{\log a - m}{\sigma}\right) \quad [16,17]$$

As equações 2.1 e 2.2 apresentam similaridades na forma de desenvolvimento. A equação 2.3 é uma distribuição log-normal para os valores dos tamanhos de defeitos. Em todas as equações, os seguintes parâmetros estatísticos são aplicados:

- a – tamanho do defeito detectado (em logarítmico);
- m – média dos tamanhos dos defeitos que foram detectados (em logarítmico);
- σ – desvio padrão dos tamanhos de defeitos detectados (em logarítmico);

Todos os parâmetros das modelagens acima estão em escala logarítmica. Apesar das equações apresentarem um bom rendimento, a distribuição log-normal é uma ferramenta simples de se obter a probabilidade de detecção.

Esta análise é comumente utilizada para ensaios não destrutivos que não apresentam algum sinal de resposta, porém pode ser aplicada em ensaios ultrassônicos sem nenhuma restrição.

No caso da análise hit/miss, somente os defeitos que foram detectados entram na modelagem. Com isso, é possível obter a seguinte relação:

$$\text{Equação 2.4: } PoD(a) = \Pr(Hit) \quad [17],$$

onde $\Pr(Hit)$ é a probabilidade referente aos defeitos detectados.

2.3.6 - ANÁLISE \hat{a} VS. A

A análise \hat{a} versus a é utilizada quando uma inspeção tem como retorno um sinal de resposta. No caso do ultrassom, o nosso sinal de resposta é convertido no tamanho de defeito medido (\hat{a}) em função de um tamanho real de defeito (a). Com isso, temos os seguintes casos de dimensionamento:

- $\hat{a} = a$; o tamanho detectado é igual ao tamanho do defeito;
- $\hat{a} > a$; o tamanho detectado é maior que o tamanho real e há um sobredimensionamento;
- $\hat{a} < a$; o tamanho detectado é menor que o tamanho real e há um subdimensionamento.

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 limite de confiança inferior que representa os sinais oriundos dos ruídos. Quando se considera um ruído como defeito, a detecção irá ocasionar um alarme falso, acusando um defeito onde não existe. Esse alarme falso pode ser quantificado através da probabilidade de falso alarme (PFA) e neste caso, ela será relevante. A Figura 2.11 apresenta uma distribuição de sinais oriundos de defeitos e de ruídos. Pode-se notar a presença de um limite de confiança delimitando os sinais e os ruídos.

Além do limite de confiança inferior, devemos levar em consideração também a necessidade de um limite de confiança superior. Este se deve ao fato de que não podemos confundir um sinal oriundo de uma alta amplitude com a raiz de uma solda, por exemplo.

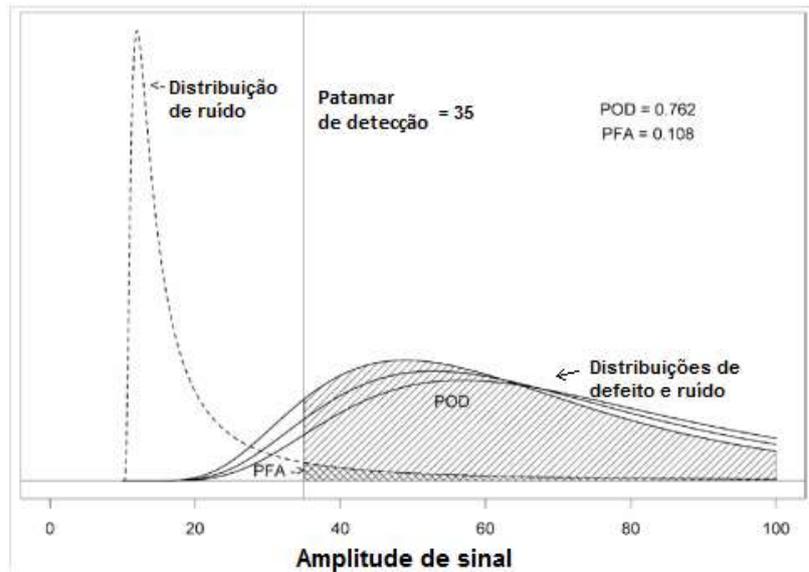


Figura 2.11 – Distribuições de sinais e ruídos [18]

Neste caso, teríamos uma outra forma de alarme falso. A Figura 2.12 apresenta uma distribuição de sinais em função do tamanho do defeito. Podemos observar a presença dos limites de confiança inferior e superior. Todos os dados que estão em ambas as linhas são desconsiderados na análise. A discriminação do resultado de saída do ensaio (sinal/imagem) deve ser derivada de todos os sinais cujas amplitudes excedam a amplitude do ruído presente [18].

A Figura 2.13 apresenta uma distribuição de sinais em função do tamanho de defeito, em escala logarítmica. É possível observar a presença de um limite de confiança superior (“saturation level”) e o inferior (“patamar de detecção”). Cada sinal possui uma função de densidade de probabilidade [18]. Quando um sinal se aproxima muito dos limites, temos que sua probabilidade de detecção será a área entre a função de densidade de probabilidade e o limite de confiança, como vemos na figura 2.14 [18]. Desta forma, a PoD pode ser expressa da seguinte forma:

$$\text{Equação 2.5: } PoD(a) = \text{Probabilidade} (\ln(\hat{a}) > \ln(a_{limite})) \quad [16]$$

Após delimitar os limites de confiança na análise \hat{a} versus a , o procedimento para determinar a curva PoD é o mesmo na análise *hit/miss*.

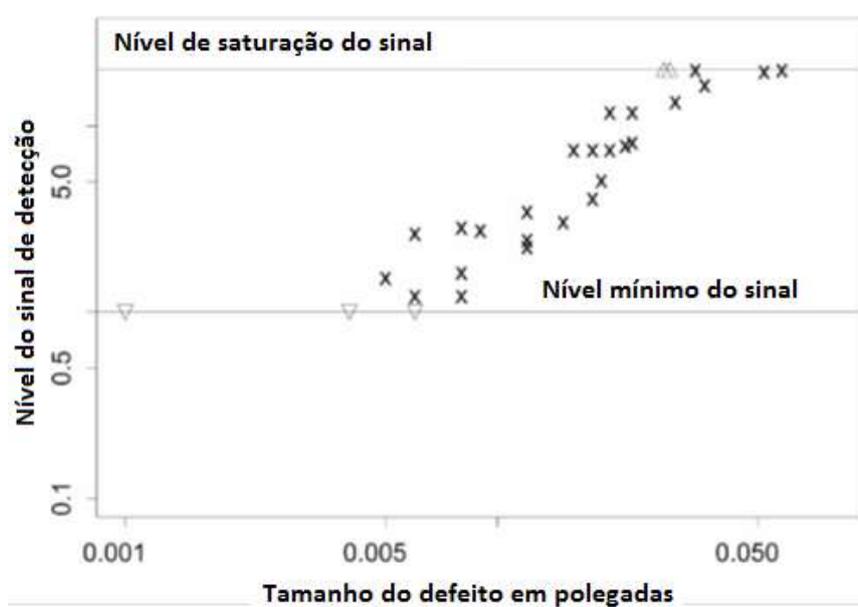


Figura 2.12 – Distribuição dos sinais em função do tamanho do defeito. Adaptado [18]

Neste caso, todos os pontos que se encontram entre os limites serão considerados como *hit* enquanto os pontos fora desse intervalo serão considerados como *miss* [18]. Aplicando uma distribuição log-normal iremos obter uma curva PoD semelhante ao outro tipo de análise, porém de uma forma mais refinada. Na figura 2.15 encontramos uma curva PoD desenvolvida através dessa análise [18].

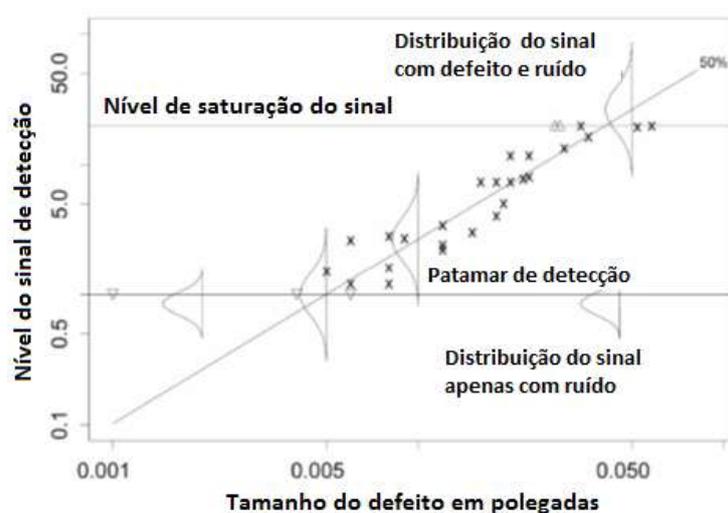


Figura 2.13 – Distribuição dos sinais em função do tamanho do defeito e as funções de densidade de probabilidade. Adaptado [18]

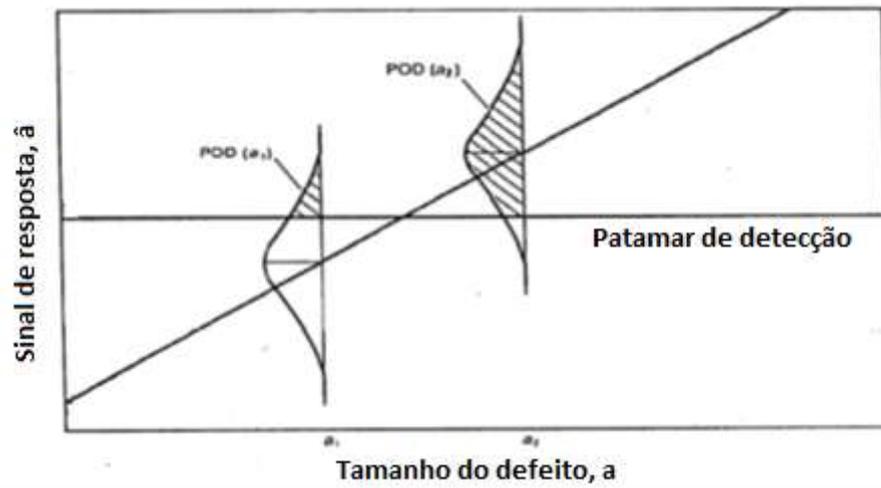


Figura 2.14 – Determinação da PoD de sinais próximos aos limites de confiança. Adaptado [18]

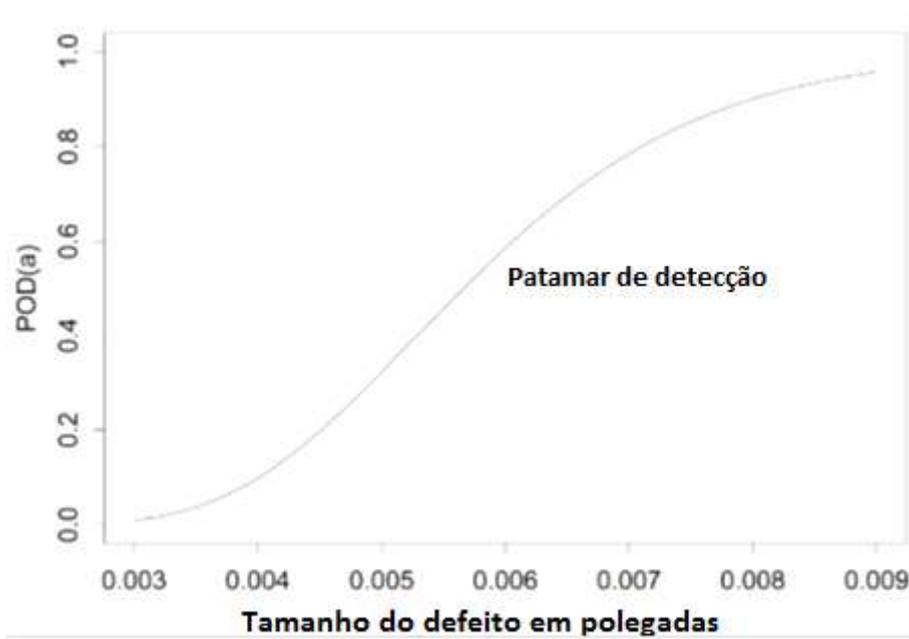


Figura 2.15 – Curva PoD para análise \hat{a} versus a . Adaptado [18].

2.3.7 – DETERMINAÇÃO DO PATAMAR DE DETECÇÃO

Em qualquer procedimento de inspeção, se a amplitude do sinal de uma determinada indicação está abaixo de um limiar de registro, a descontinuidade detectada não será admitida como defeito e sim como ruído. Inversamente, suprimindo erros humanos e de equipamento, qualquer sinal acima deste limiar será registrado como defeito detectado. A curva POD está entre estes dois extremos [19].

A Figura 2.16 exemplifica um gráfico com dados de \hat{a} versus a para 28 trincas obtidas por uma determinada técnica. A partir do gráfico é possível observar que duas trincas não foram detectadas pelo sistema porque o valor de \hat{a} estava abaixo do limiar de registro do sinal, \hat{a}_{th} . O valor de \hat{a} para cinco trincas excedeu o limite de saturação, \hat{a}_{sat} , do sistema de registro, ou seja, independente da resposta do sinal em pontos de cada uma dessas trincas, o registro no sistema será o mesmo para essas trincas. Para esta inspeção, o limiar de decisão ou patamar de detecção foi ajustado em 250 pontos, portanto, apenas as trincas cujo sinal de resposta está acima deste valor serão consideradas detectadas pelo sistema.

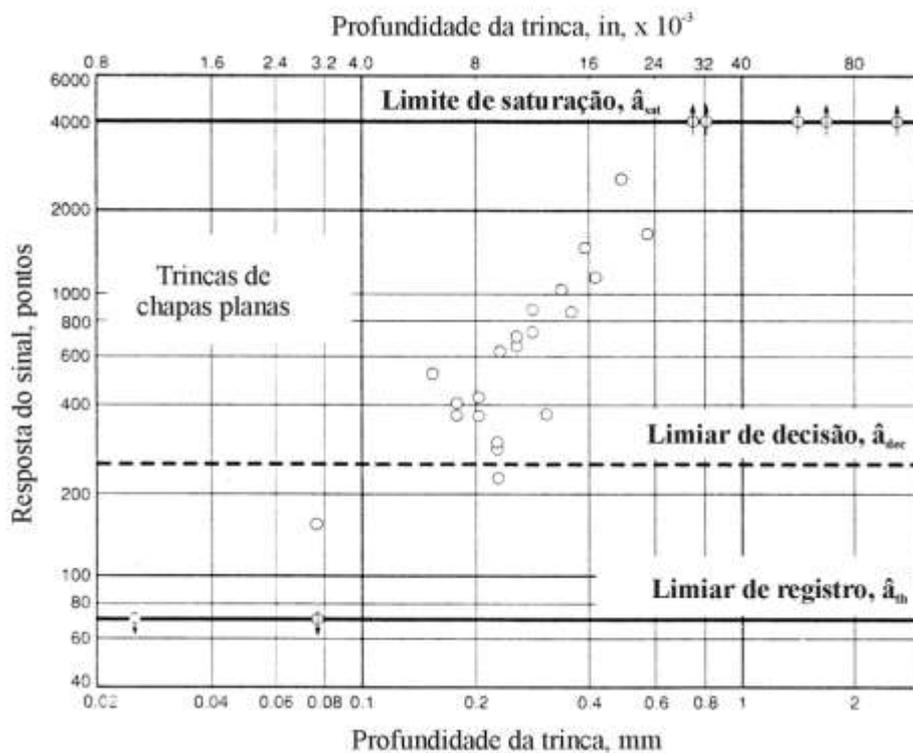


Figura 2.16 - Exemplo de resposta do sinal de inspeção como função da profundidade da trinca [19].

Uma das ferramentas utilizadas na determinação do limiar de registro são as Curvas ROC, que relacionam a probabilidade de detecção com a probabilidade de falso alarme como ruídos do sistema, por exemplo. A construção de Curvas ROC é feita a partir de um corpo de prova contendo refletores ou defeitos com dimensões e localização conhecidos, variando-se o patamar de detecção.

A redução do limiar de corte provoca aumento na detecção de sinais, os quais podem ser oriundos de defeitos do corpo de prova ou de ruídos no sistema. A Figura 2.17 ilustra um exemplo de inspeção. Para este caso o patamar de detecção está estabelecido em 50%, ou seja, para ser considerado um defeito é necessário que o sinal de resposta ultrapasse 50% da tela do aparelho. Reduzindo o limiar de detecção para 30%, por exemplo, outros sinais emitidos pelo sistema serão considerados defeitos. No entanto, sinais oriundos de ruídos podem ser mal interpretados como sendo defeitos, atrapalhando a inspeção. Esses sinais são chamados de falso alarme e, uma vez conhecida a posição dos defeitos contidos no corpo de prova é possível determinar a proporção de defeitos detectados (PoD) e de falso alarme (PFA) para cada valor de patamar de detecção.

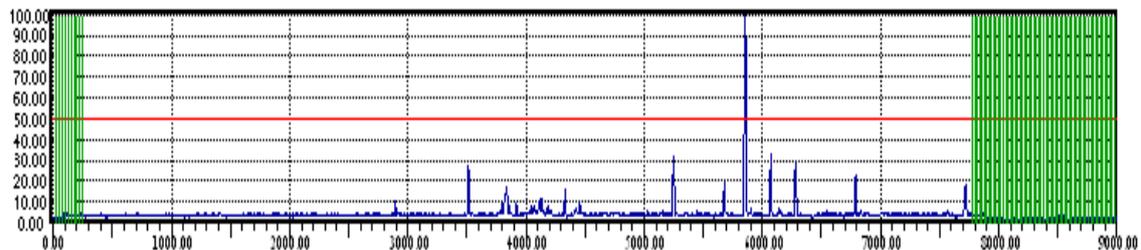


Figura 2.17 – Exemplo de inspeção ultrassônica e patamar de detecção em 50% da tela do aparelho [19].

Na Figura 2.18 observa-se um exemplo da modelagem de uma Curva ROC. Nota-se que a redução do patamar de detecção resulta em aumento da probabilidade de detecção, pois defeitos com menor amplitude de sinal são detectados. Todavia, ruídos em regiões onde não há presença de descontinuidades também são contabilizados, resultando em aumento da probabilidade de falso alarme.

Para determinar o limiar de detecção mais adequado ao sistema é analisado o ponto de inflexão da curva, pois nesse ponto tem-se melhor relação entre PoD e PFA. Para menores valores de Patamar de detecção a PFA tem aumento maior que a PoD, o que não é desejável. Por outro lado, utilizar valores de Patamar de detecção acima, ou seja, à esquerda da inflexão da curva, pode ser conservador demais, negligenciando a detecção de defeitos com baixa amplitude que poderiam ser detectados.



Figura 2.18 – Exemplo de modelagem da curva ROC com destaque em vermelho na região mais adequada para estabelecer o Patamar de detecção.

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CORPO DE PROVA

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado como corpo de prova (CP) um tubo de aço Carbono de especificação API X65, com diâmetro nominal de 45,72cm, espessura de parede 28,32mm e comprimento de 12m com solda longitudinal oriunda do processo de soldagem por arco submerso (SAW). Este corpo de prova continha 99 grafites usinados previamente inseridos em diferentes regiões da solda, com espaçamento de 100 mm entre si e com dimensões variadas de altura e comprimento, como mostra a Figura 3.1.



Figura 3.1 – Corpo de prova com identificação da posição dos grafites

O grafite pôde ser usado para simular trincas e porosidades uma vez que suas propriedades acústicas são diferentes das do aço Carbono. Sendo assim, a onda mecânica emitida durante o ensaio ultrassônico é refletida ao chocar-se com o grafite de forma semelhante ao que ocorreria em uma porosidade.

Para este estudo, foram selecionados 43 grafites simulando 4 tipos de defeitos comuns em juntas soldadas: falta de fusão (FF), falta de penetração (FP), trinca superficial longitudinal (TSL) e trincas na zona termicamente afetada (ZTA).

A relação das descontinuidades inseridas com suas respectivas posições pode ser observada na tabela 3.1. As dimensões dos defeitos variaram de 0,35 a 2,1 mm para

a altura e de 1,5 a 12 mm para o comprimento. Acredita-se que estes intervalos de altura e comprimento compreendem tanto as descontinuidades aprovadas, que necessitam de observação e monitoramento, mas não necessitam de reparo, quanto as descontinuidades reprovadas, ou seja, defeitos que precisam de reparo imediato para não comprometer a integridade do equipamento.

Para inserir os grafites, o tubo foi cortado pelo processo de goivagem com eletrodo de grafite. Após a inserção, a cavidade do cordão foi fechada através do processo TIG. Em seguida, a análise radiográfica foi utilizada como método de END complementar para comprovar a posição e orientação dos grafites, como mostra a Figura 3.2.



Figura 3.2 – Validação da técnica de grafite como representação de defeitos e verificação do posicionamento e orientação do grafite no cordão de solda.

3.2 – ARRANJO DO SISTEMA DE ULTRASSOM

O sistema de ultrassom estudado foi do tipo automatizado, utilizado diariamente nas inspeções de uma grande empresa fabricante de tubos. É composto por um veículo com rodas magnéticas que permite sua fixação e deslocamento ao longo do tubo. Acoplado ao veículo, um conjunto de sensores simétricos são responsáveis pelo ensaio ultrassônico, com isso, o fator de incerteza do ensaio relacionado à falha humana é minimizado. Os tubos que serão inspecionados são colocados em esteiras e o sistema ultrassônico é então posicionado sobre cada tubo para dar início à inspeção dinâmica.

Tabela 3.1 – Classe representada, posição e localização transversal dos 43 grafites inseridos no tubo.

Defeito	Classe	Canal	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)
1	FF	L2	0,35	1,5	7,0
2	FF	L1	0,70	3,0	7,0
3	FF	L2	1,40	3,0	7,0
4	FF	L1	2,10	12,0	7,0
5	FF	L2	2,10	3,0	7,0
6	ZTA	L1	0,35	6,0	0,5
7	ZTA	L2	0,35	1,5	0,5
8	ZTA	L1	0,70	6,0	0,5
9	ZTA	L2	0,70	3,0	0,5
10	ZTA	L1	0,70	1,5	0,5
11	ZTA	L2	1,40	12,0	0,5
12	ZTA	L1	1,40	6,0	0,5
13	ZTA	L2	1,40	3,0	0,5
14	ZTA	L1	2,10	6,0	0,5
40	FF	L3	0,35	6,0	23,5
42	FF	L3	1,40	6,0	23,5
55	ZTA	L3	0,35	1,5	23,5
57	ZTA	L3	0,70	3,0	23,5
59	ZTA	L3	1,40	12,0	23,5
61	ZTA	L3	1,40	3,0	23,5
63	ZTA	L3	2,10	3,0	23,5
76	TSL	L5 e L6	0,35	6,0	0,5
77	TSL	L5 e L6	0,35	1,5	0,5
78	TSL	L5 e L6	0,70	6,0	0,5
79	TSL	L5 e L6	0,70	3,0	0,5
80	TSL	L5 e L6	0,70	1,5	0,5
81	TSL	L5 e L6	1,40	12,0	0,5
82	TSL	L5 e L6	1,40	6,0	0,5
83	TSL	L5 e L6	1,40	3,0	0,5
84	TSL	L5 e L6	2,10	6,0	0,5
85	TSL	L5 e L6	2,10	3,0	0,5
86	FP	L9 e L10	0,35	12,0	15,0
87	FP	L9 e L10	0,35	6,0	15,0
88	FP	L9 e L10	0,35	3,0	15,0
90	FP	L9 e L10	0,70	6,0	15,0
91	FP	L9 e L10	0,70	3,0	15,0
92	FP	L9 e L10	0,70	1,5	15,0
94	FP	L9 e L10	1,40	6,0	15,0
95	FP	L9 e L10	1,40	3,0	15,0
96	FP	L9 e L10	1,40	1,5	15,0
97	FP	L9 e L10	2,10	6,0	15,0
98	FP	L9 e L10	2,10	3,0	15,0
99	FP	L9 e L10	0,35	3,0	15,0

Cada posição do grafite no cordão de solda possui um determinado transdutor responsável por sua detecção. Os canais L1 e L2, por exemplo, são responsáveis pela detecção de defeitos na superfície externa do lado direito e esquerdo do tubo, respectivamente. Os canais L3 e L4 detectam defeitos na superfície interna do lado direito e esquerdo, respectivamente. Tanto o canal L5 quanto o canal L6 são responsáveis por defeitos na região central da superfície externa do cordão. Analogamente, os canais L7 e L8 detectam defeitos na superfície interna no centro do cordão (raiz da solda). Os canais L9 e L10 foram posicionados para detectar defeitos que simulam falta de penetração que aparecem, usualmente, à meia altura do cordão. Para esse caso, os grafites foram posicionados a 15mm de profundidade. A Figura 3.3 ilustra a posição dos canais em relação ao cordão.

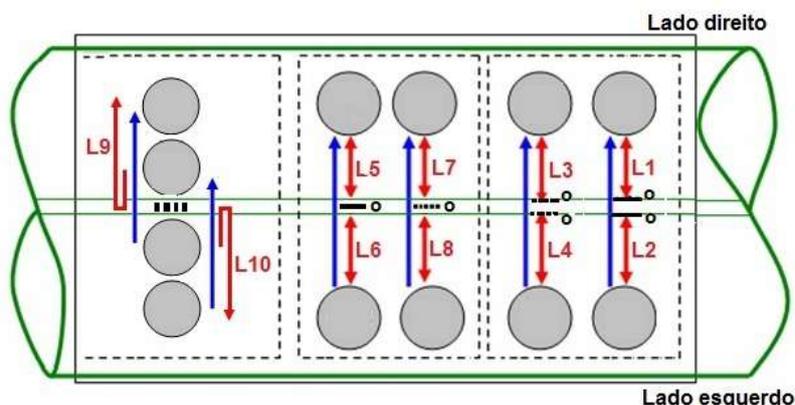


Figura 3.3 – Canais posicionados para detectar defeitos em diferentes regiões da solda.

Para detectar os defeitos presentes em diferentes regiões do cordão é necessário que cada canal apresente angulação do cabeçote e distância em relação ao centro da solda. A configuração de cada transdutor se encontra descrita na Tabela 3.2.

Com o objetivo de avaliar a confiabilidade do ensaio ultrassônico e propor melhorias em relação à detecção de defeitos do sistema, 12 passadas de inspeção foram realizadas no corpo de prova, a partir de configurações de calibração do tubo padrão previamente determinadas. Nesta fase do projeto não houve a preocupação em dimensionar o defeito, apenas identificar se ele foi detectado ou não pelo sistema.

Tabela 3.2 – Características dos transdutores do sistema ultrassônico.

Canal	Distância (mm)	Ângulo	Frequência (MHz)
L1	80	45°	4
L2	80	45°	4
L3	59	56,5°	4
L4	67	56°	4
L5/L6	64	46°	4
L7/L8	59	61,5°	4
L9/L10	71	70°	4

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - INSPEÇÃO ULTRASSÔNICA

Utilizando o sistema ultrassônico com características descritas no capítulo anterior, foram realizadas 12 rodadas de inspeções no mesmo corpo de prova. Na tabela 4.1 estão contidos os valores de maior amplitude em cada passada (P1,...,P12) para cada defeito contido no CP. Vale lembrar que a amplitude máxima foi obtida analisando as amplitudes dentro do intervalo de tolerância de $\pm 25\text{mm}$ em torno da posição do defeito. Ademais, não foi levado em consideração, nesta etapa, se a resposta sônica máxima foi obtida pelo canal responsável por monitorar a região da solda em que o defeito em questão se encontrava.

É importante ressaltar que os defeitos que obtiveram valores de amplitude acima do patamar de detecção, isto é, acima de 50% foram considerados detectados e ganharam destaque, em marrom, na tabela. Já os defeitos com amplitudes abaixo do patamar de detecção, foram considerados não detectados para a modelagem da Curva PoD.

4.2 - MODELAGEM DAS CURVAS POD

A partir dos valores de amplitude obtidos na Tabela 4.1, iniciou-se o processo de modelagem das primeiras Curvas PoD através da análise *Hit/Miss* em função da altura de cada defeito. Modelagens priorizando a dimensão do comprimento das discontinuidades também foram realizadas, no entanto os resultados não permitiram uma avaliação conclusiva, como mostra a Figura 4.1. O que pode ser observado nos gráficos que compõem a Figura 4.1 é que pouco se assemelham ao formato da curva baseada em dados reais mostrada na Figura 2.8 (página 9). Não se percebe neste caso nenhum tipo de tendência crescente quando considera-se a dimensão do comprimento, ou seja, é como se a proporção de detecção permanecesse a mesma não importando a dimensão do defeito caracterizando assim um comportamento quase aleatório. Esse efeito é um pouco diminuído no gráfico que mostra a relação com a altura, tornando-a a dimensão mais relevante na detecção pelo sistema, como afirmado por *Krautkrämer* [20].

Tabela 4.1 – Resultado das amplitudes máximas de cada defeito com destaque, em marrom, para os valores acima do Patamar de detecção.

Defeito	Amáx. P1	Amáx. P2	Amáx. P3	Amáx. P4	Amáx. P5	Amáx. P6	Amáx. P7	Amáx. P8	Amáx. P9	Amáx. P10	Amáx. P11	Amáx. P12	Amp. Média
1	53	32	44	36	35	35	34	31	35	37	33	34	36,6
2	90	92	90	90	90	90	87	87	83	86	92	89	88,8
3	57	59	55	56	56	51	55	57	58	58	58	56	56,3
4	53	49	46	49	41	49	45	55	43	46	38	47	46,8
5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100,0
6	33	35	36	35	35	36	33	36	36	35	34	35	34,9
7	36	37	37	32	33	31	36	31	32	32	35	36	34,0
8	47	46	44	42	42	48	46	46	45	43	46	44	44,9
9	43	46	55	56	52	52	51	52	46	58	49	47	50,6
10	35	34	36	41	47	42	46	44	41	41	52	46	42,1
11	46	47	52	54	55	53	50	53	51	52	54	50	51,4
12	54	61	55	49	56	60	55	52	54	56	54	52	54,8
13	58	56	57	54	57	57	60	54	59	58	60	57	57,3
14	78	82	74	74	62	70	81	86	83	81	67	73	75,9
40	38	35	38	39	37	30	36	37	36	36	40	37	36,6
42	45	37	44	33	34	37	28	32	32	31	34	32	34,9
55	31	32	33	34	32	29	29	37	42	28	32	46	33,8
57	32	35	34	34	40	32	32	32	33	32	32	32	33,3
59	42	44	49	43	53	43	37	36	61	48	48	36	45,0
61	69	79	91	80	90	80	91	92	96	35	86	97	82,2
63	73	78	100	73	99	81	36	100	100	94	70	100	83,7
76	39	37	42	37	37	37	38	36	37	36	39	35	37,5
77	35	32	35	36	34	33	35	33	33	32	34	34	33,8
78	28	30	29	33	47	46	33	35	33	33	40	39	35,5
79	35	29	32	31	31	32	32	31	31	31	35	35	32,1
80	37	39	42	41	41	43	42	35	40	41	41	41	40,3
81	61	56	59	59	63	59	50	53	58	56	60	56	57,5
82	54	63	65	55	51	50	51	50	63	55	60	49	55,5
83	35	33	35	35	35	35	33	35	34	35	36	35	34,7
84	42	43	46	40	42	47	42	46	43	46	48	49	44,5
85	67	63	68	65	63	61	60	63	57	72	66	65	64,2
86	29	30	31	26	29	29	29	27	29	28	29	32	29,0
87	26	26	24	26	23	48	21	24	23	24	23	24	26,0
88	24	27	25	28	31	26	37	45	43	46	48	36	34,7
90	61	75	74	48	72	40	77	73	46	61	38	73	61,5
91	34	46	37	43	48	45	54	53	49	48	49	39	45,4
92	40	47	45	52	30	38	58	75	54	43	46	72	50,0
94	40	39	37	39	39	42	38	40	39	41	45	38	39,8
95	49	57	43	49	48	47	44	60	48	48	49	44	48,8
96	27	35	45	35	41	38	61	43	48	48	37	55	42,8
97	28	41	33	29	36	26	70	32	30	25	28	40	34,8
98	87	95	91	86	89	90	76	91	92	89	85	90	88,4
99	25	32	31	32	29	24	28	24	32	29	26	22	27,8

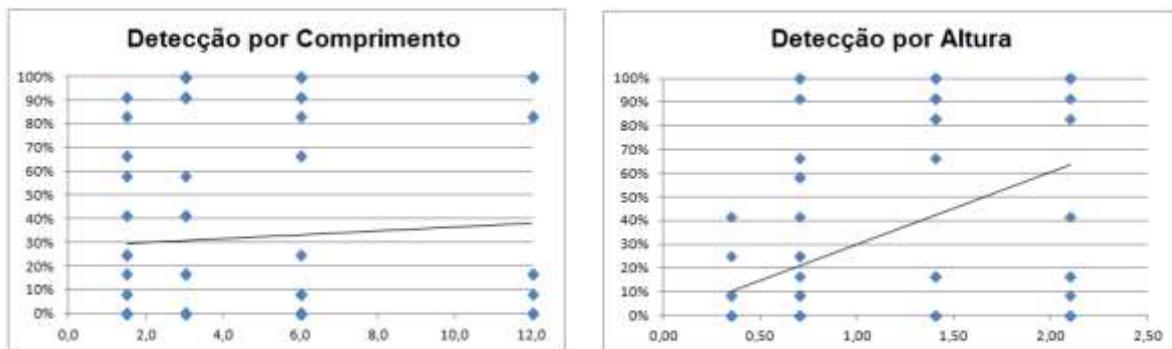


Figura 4.1 – Análise preliminar dos resultados: Proporção de detecção em função da altura e comprimento das descontinuidades.

Como mencionado anteriormente, na presente análise toda detecção será contabilizada no desenvolvimento da curva PoD, ou seja, caso o sistema de ultrassom detecte um defeito ele será denominado *hit* e os que não forem detectados serão denominados *miss*. Desta forma, temos que um defeito detectado terá $PoD(a) = 1$, enquanto o defeito não detectado terá $PoD(a) = 0$.

As curvas foram construídas pelo software *mh1823*, pois permite uma análise completa de confiabilidade, informando os valores exatos de patamar de detecção e do tamanho crítico do defeito. Em um primeiro momento, foi modelada uma curva sem restrições, ou seja, não houve separação entre tipo de defeito ou canal. Esta curva foi construída para avaliar o comportamento geral do conjunto de transdutores e o resultado pode ser observado na Figura 4.2.

Para compreender melhor o funcionamento do sistema, foram construídas quatro novas curvas, uma para cada tipo de defeito contido no CP (FF, ZTA, TSL e FP). Esta divisão permitiu uma análise PoD de acordo com a localização do defeito no cordão de solda e, de modo consequente, acreditou-se que seria possível analisar a eficiência de cada canal do arranjo, uma vez que sua configuração se sujeitou à posição do defeito no cordão. Nas Figuras 4.3 a 4.6 verifica-se o comportamento das Curvas PoD de acordo com o tipo de defeito.

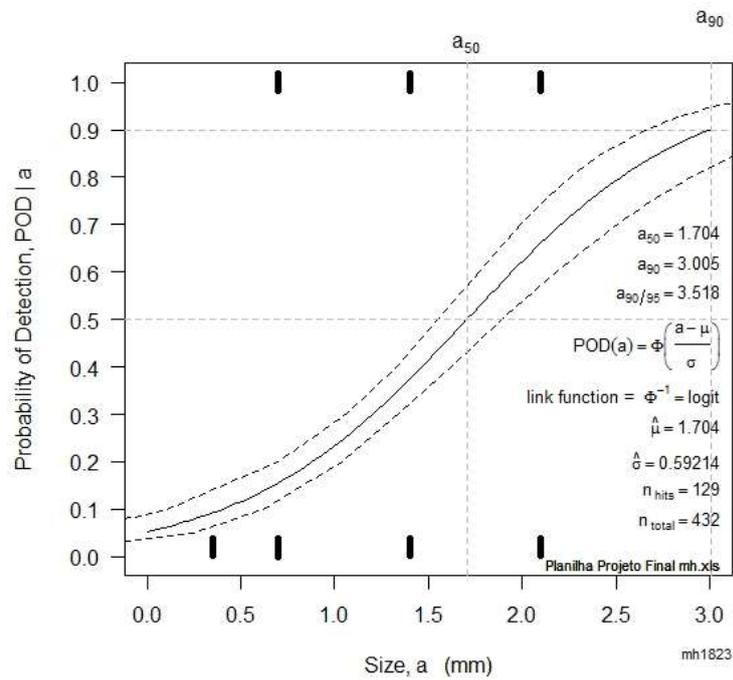


Figura 4.2 – Curva PoD do sistema estudado.

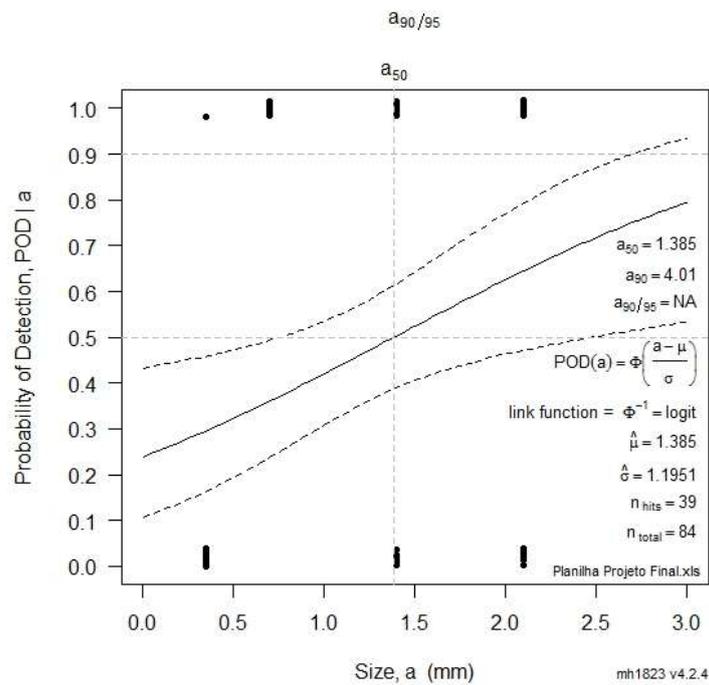


Figura 4.3 – Curva PoD de defeitos do tipo FF.

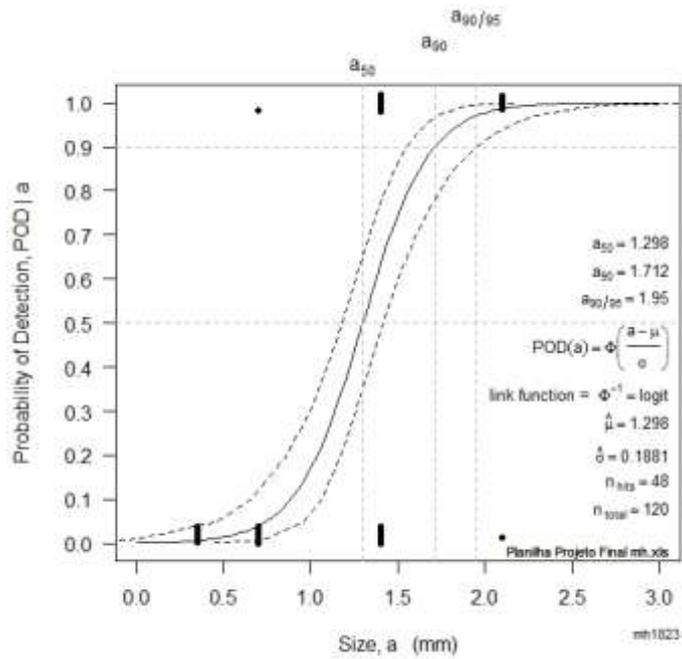


Figura 4.4 – Curva PoD de defeitos na ZTA.

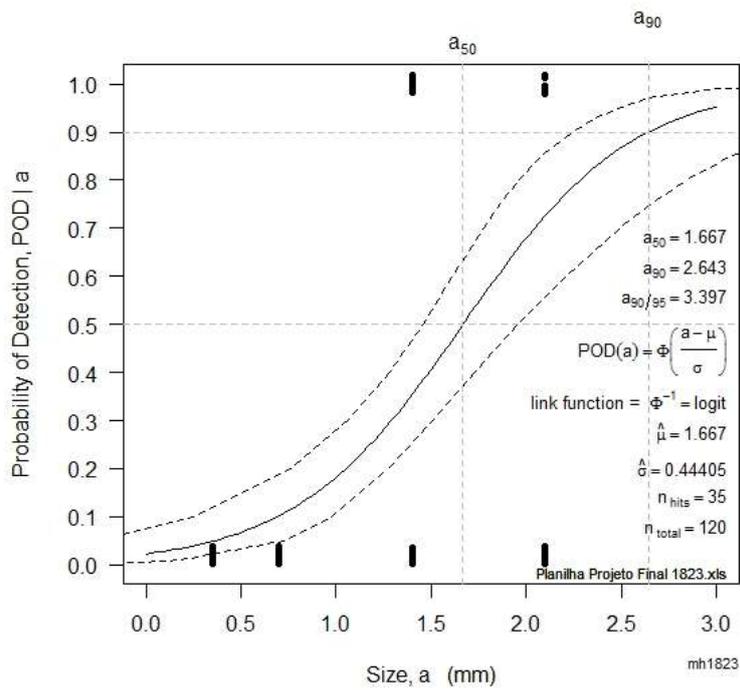


Figura 4.5 – Curva PoD de Trincas Superficiais Longitudinais (TSL).

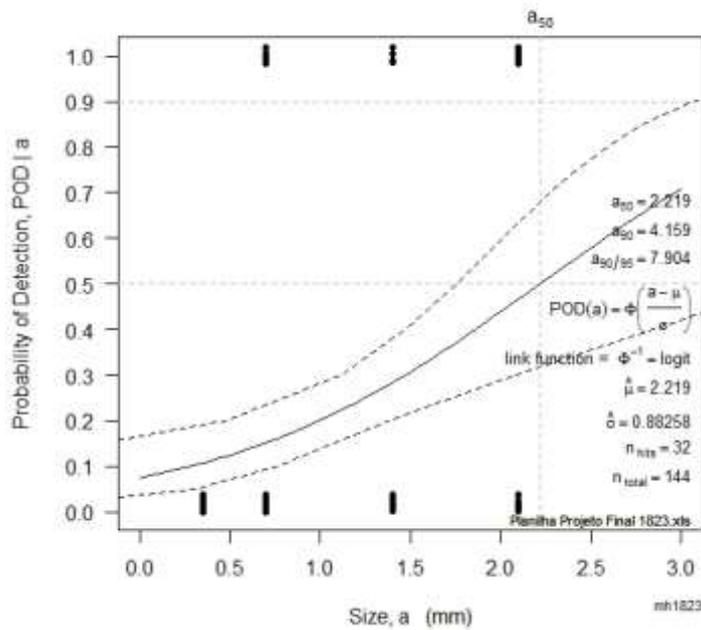


Figura 4.6 – Curva PoD de Falta de Penetração (FP).

Após a divisão das curvas de acordo com o tipo de defeito, começaram a surgir alguns questionamentos. Em alguns casos, defeitos superficiais com altura e/ou comprimento relativamente elevados que, supostamente, deveriam apresentar alta proporção de detecção não o fizeram. Por outro lado, defeitos menores foram detectados com maior frequência.

Ao observar a tabela 4.2 é possível perceber que dependendo do tipo de defeito, há maior ou menor convergência entre os valores de a_{90} e $a_{90/95}$. Isso significa que a confiabilidade de detecção entre defeitos de diferentes naturezas varia. O resultado que se aproxima do ideal é aquele em que a divergência entre os valores de a_{90} e $a_{90/95}$ é menor. Neste caso, defeitos do tipo ZTA são o que apresentam maior aproximação entre a_{90} e $a_{90/95}$ ao contrário de defeitos do tipo Falta de Fusão, em que não foi possível determinar a dimensão correspondente ao $a_{90/95}$.

Tabela 4.2 – Diferença entre os valores de a90 e a90/95 relativa às PoDs por defeito

	Todos	FF	ZTA	TSL	FP
a90	3,005	4,01	1,712	2,643	4,159
a90/95	3,518	NA	1,95	3,397	7,904
Δ	0,513		0,238	0,754	3,745

Nos casos em que as curvas estão distantes umas das outras, observa-se a divergência entre a90 e a90/95. A forma de curva que mais se aproxima do desejado (curva “S”) é a explicitada na Figura 4.4. Exatamente a que traz menor divergência entre valores numéricos de a90 e a90/95.

Além disso, em uma análise mais rigorosa que será detalhada adiante no gráfico da Figura 4.17, foi possível observar que em muitos casos a amplitude máxima não era obtida pelo canal responsável por detectar certo defeito, isso implica que outros canais desempenham sua função ou nenhum canal monitora adequadamente determinada região da solda. É evidente que, uma vez detectado o defeito, independente do canal que o detectou, o conjunto de transdutores de certa forma foi eficaz. Porém, quando se avalia a confiabilidade de cada um dos canais na inspeção, é necessário verificar com qual efetividade eles detectam discontinuidades para as quais os canais foram calibrados. Com o objetivo de investigar a eficiência de cada setor do arranjo ultrassônico, o passo seguinte foi separar a detecção por canal: L1, L3, L5+L6 e L9+L10. Nesta etapa, o sinal de resposta utilizado foi o sinal emitido pelo canal responsável por monitorar a região da solda em que o defeito em questão se encontrava. Os canais L5 e L6 atuam em conjunto monitorando o centro da superfície externa do cordão. Isto implica que quando pelo menos um dos canais emitir um sinal de resposta acima do patamar de detecção, o defeito é considerado detectado. O mesmo acontece com os canais L9 e L10 no monitoramento da região à meia altura do cordão de solda. O resultado das Curvas PoD por tipo de canal está mostrado nas Figuras 4.7 a 4.10.

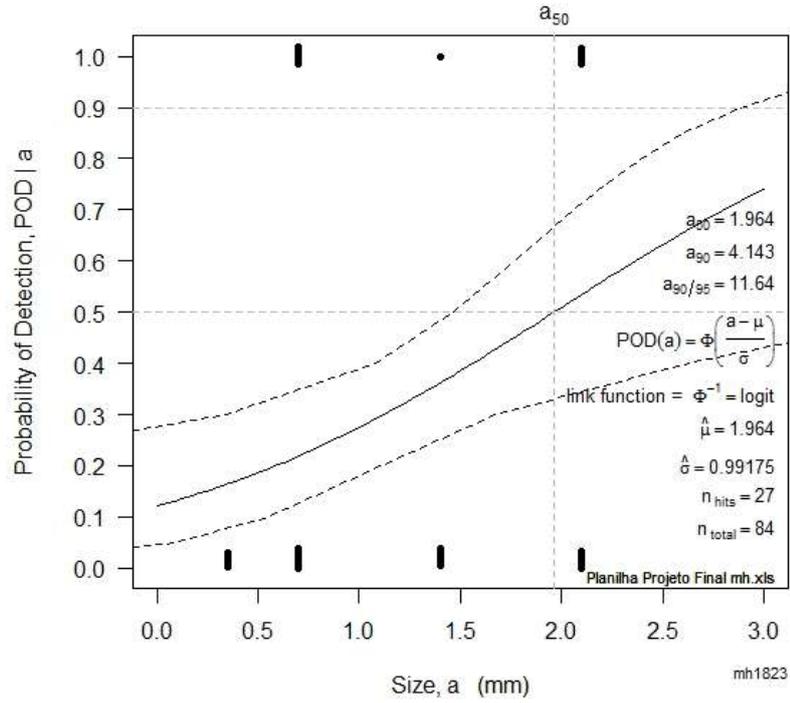


Figura 4.7 – Curva PoD considerando o sinal emitido pelo canal L1.

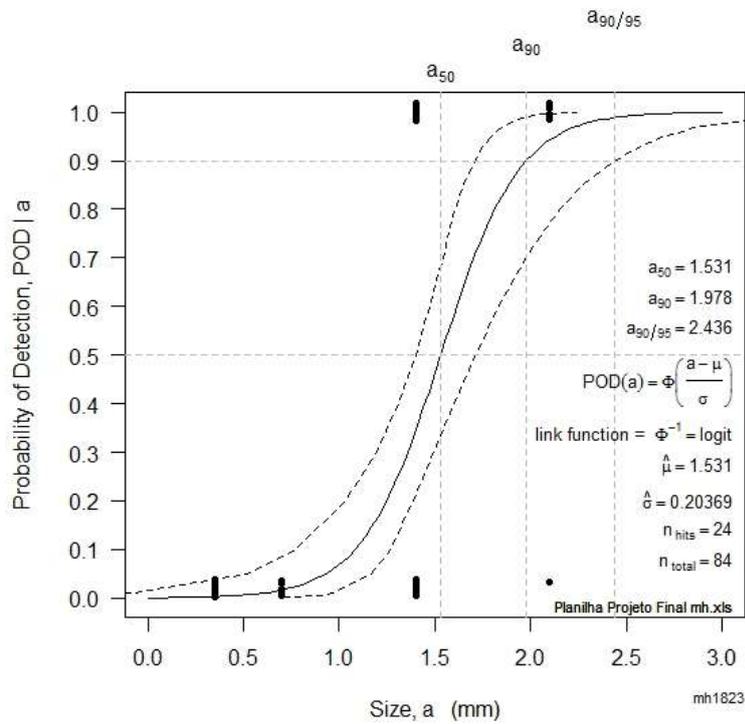


Figura 4.8 – Curva PoD considerando o sinal emitido pelo canal L3.

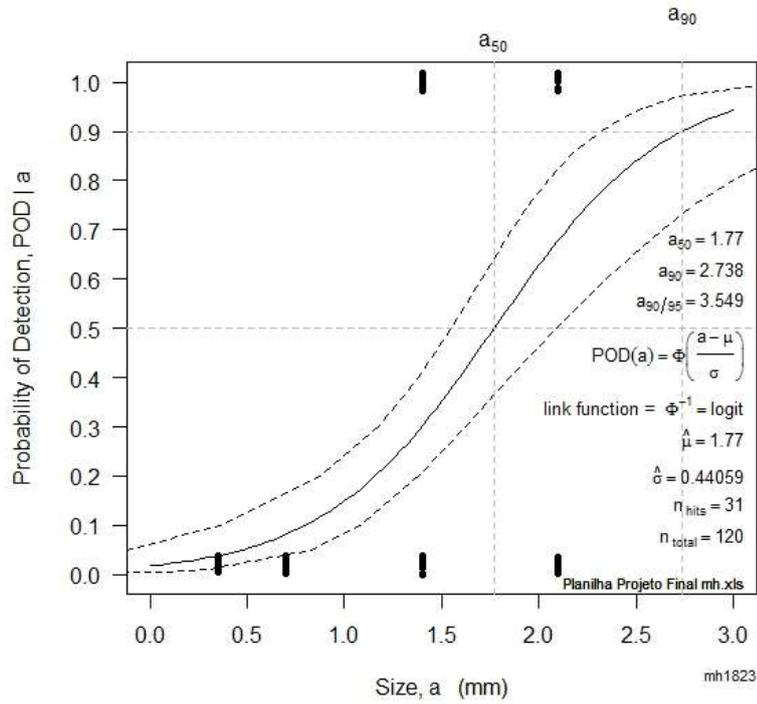


Figura 4.9 – Curva PoD considerando o sinal emitido pelos canais L5 e L6.

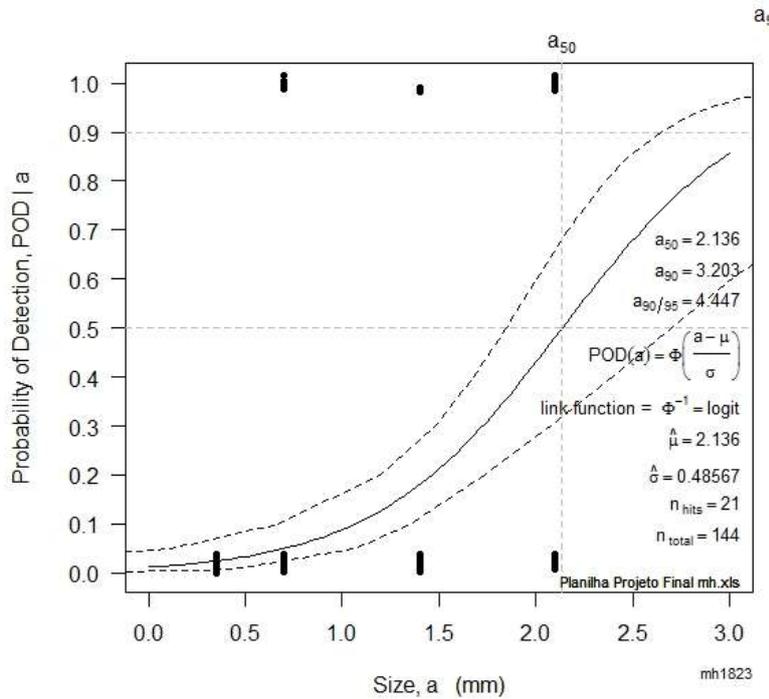


Figura 4.10 – Curva PoD considerando o sinal emitido pelos canais L9 e L10.

Após a divisão das Curvas PoD por canal, algumas dúvidas foram esclarecidas a respeito do desempenho do sistema. Foi notado, por exemplo, que os canais L4 e L7+L8 apresentaram desempenho muito abaixo do esperado, exibindo resultados aleatórios de detecção. O canal L5, por sua vez, não realizou nenhuma detecção, transferindo para o canal L6 toda a responsabilidade na detecção dos defeitos da dupla L5+L6.

4.3 – O SIMULADOR CIVA™

O resultado das primeiras inspeções do CP pelo sistema automatizado, PoD's preliminares mostraram que a capacidade de detecção do sistema estava aquém da considerada satisfatória. Uma hipótese aventada foi a de que talvez, as configurações de calibração do sistema de UT não estivessem ajustadas de maneira a maximizar a resposta sônica. Sendo assim, a ferramenta de simulação foi utilizada para que essa etapa de configuração da calibração pudesse ser otimizada. Resultados com as PoD's iniciais serão mostrados no capítulo de Resultados e Discussões.

O software de simulação CIVA™, desenvolvido pela Comissão Francesa de Energia Atômica e Energias Alternativas (CEA), é uma excelente ferramenta quando se deseja planejar a inspeção ou aprimorar a detecção de trincas em chapas e tubos. Através do CIVA™ é possível visualizar o percurso do feixe sônico dentro do material que está sendo inspecionado, de forma a compreender um comportamento aparentemente anômalo durante a inspeção.

O CIVA™ não é um software aberto e precisa de licença paga para ser usado. As simulações aqui desenvolvidas foram realizadas usando, com permissão cedida, a licença do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem da UFRJ (LNDC/COPPE/UFRJ) que pertence ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Em primeiro lugar, foi realizado o desenho do sólido virtual que representará o corpo de prova. Posteriormente, foi feita a inserção dos 43 defeitos de grafite no tubo de 12 m, respeitando a orientação e as dimensões dos mesmos no CP. Em seguida,

foram posicionados os transdutores com as mesmas propriedades dos transdutores reais. Finalmente, foram iniciadas as simulações. As etapas da simulação mencionadas neste parágrafo serão detalhadas adiante.

4.3.1 – DESENHO DO SÓLIDO VIRTUAL

As figuras 4.11 a 4.13 abaixo mostram a primeira etapa de uma simulação computacional de um ensaio não destrutivo, que é o desenho do sólido virtual que respeita as características da tubulação real. O chanfro de soldagem usado foi um chanfro em X ou duplo V, projetado a partir de uma macrografia retirada do tubo a partir de ensaio destrutivo.

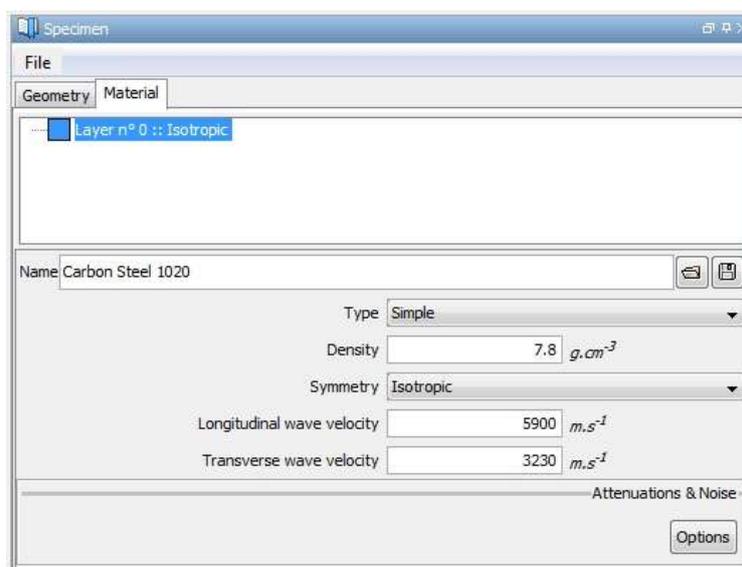


Figura 4.11 – Determinação do material e geometria do CP.

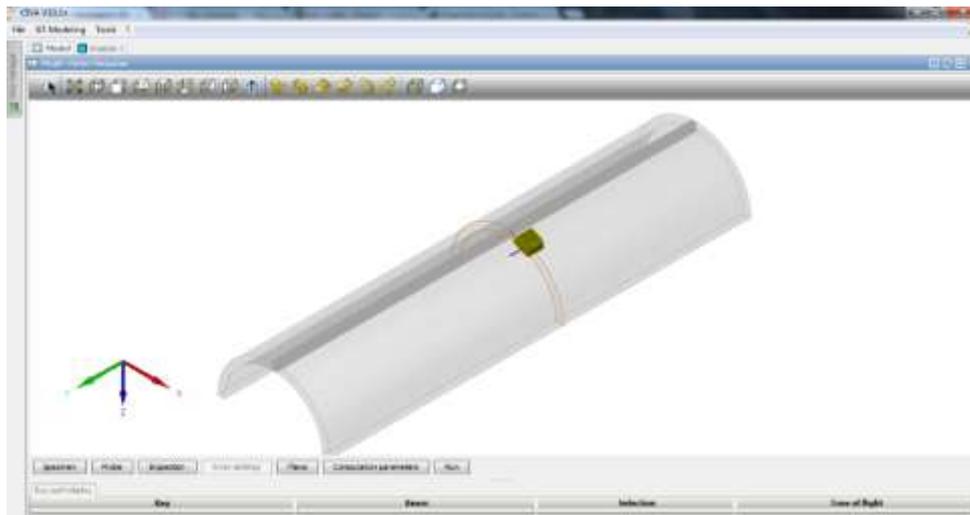


Figura 4.12 - Desenho do sólido virtual com vista do chanfro.

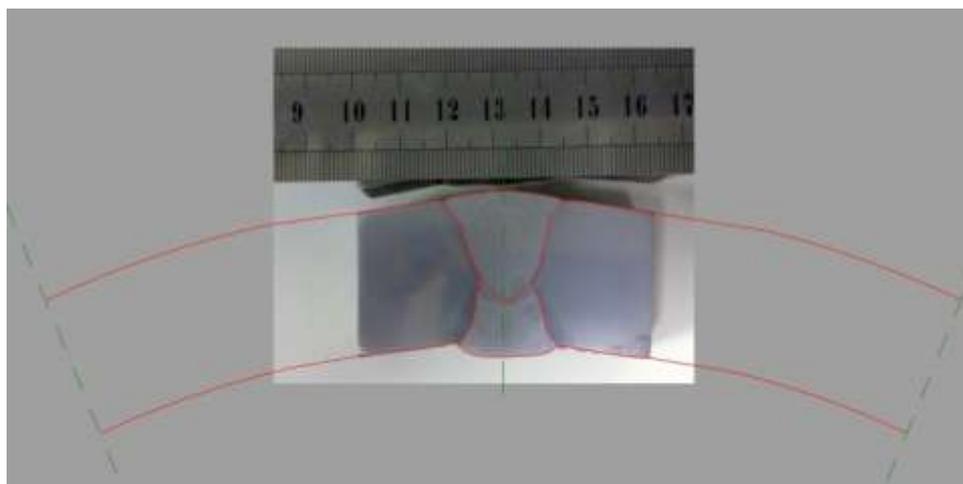


Figura 4.13 – Desenho do cordão de solda a partir de uma macrografia do tubo.

4.3.2 – INSERÇÃO DOS DEFEITOS VIRTUAIS

Uma vez desenhado o sólido virtual, inicia-se o processo de inserção dos defeitos. O material escolhido para representá-los foi o Carbono e eles foram posicionados conforme previsto no projeto, sempre respeitando os valores de altura, comprimento e profundidade.

4.3.3 – CONFIGURAÇÃO DOS TRANSDUTORES

Nesta etapa determinam-se as características fundamentais de cada transdutor do arranjo do sistema ultrassônico, tais como: geometria da sapata, tipo e velocidade da onda emitida, ângulo do cristal e frequência do transdutor, como mostra a Figura 4.14.

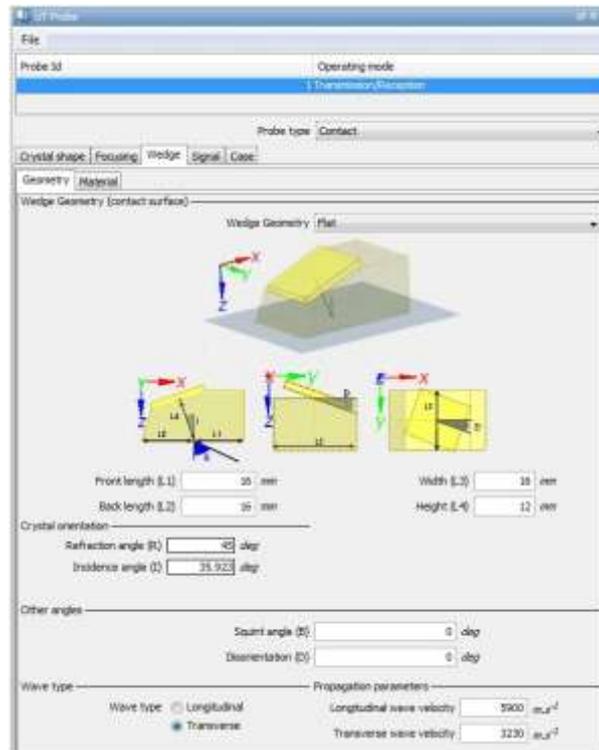


Figura 4.14 – Determinação das características dos transdutores.

4.3.4 – APLICAÇÃO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

A metodologia utilizada para verificação da posição ideal dos cabeçotes seguiu os seguintes passos:

- 1 - Simulação de inspeção utilizando os parâmetros mencionados na Tabela 3.2;
- 2 - Varredura de cada canal na posição transversal à solda para identificar o ponto em que a resposta sônica é máxima (Figura 4.15);
- 3 - Variação do ângulo do transdutor de ± 5 graus;
- 4 - Repetição do 2º passo;
- 5 - Variação do ângulo do transdutor de ± 2 graus;
- 6 - Comparações de todos os resultados através do gráfico de amplitudes (AScan).

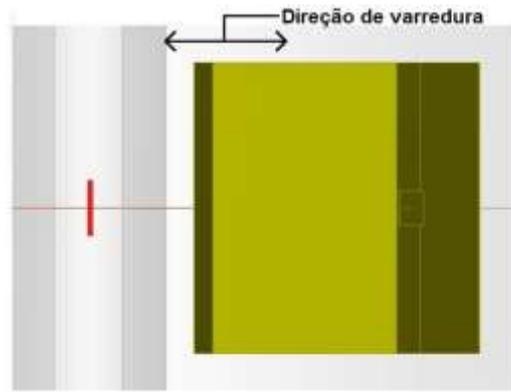


Figura 4.15 - Varredura na posição transversal à solda para encontrar o valor máximo de amplitude.

Uma vez compreendido o comportamento de cada canal, iniciou-se o processo para tentar aumentar a PoD do conjunto de canais através do software de simulação CIVA. Já com o sólido virtual projetado, os defeitos inseridos e os transdutores posicionados, inúmeras simulações foram rodadas com a intenção de avaliar e aprimorar o posicionamento e angulação dos transdutores no oleoduto. De acordo com o CIVA, os parâmetros de inspeção utilizados poderiam ser alterados na tentativa de aumentar a quantidade de detecção por parte dos transdutores. Desta forma, foram sugeridos novos parâmetros de calibração para alguns canais que, em princípio, seriam utilizados nas inspeções seguintes. A Tabela 4.3 descreve a calibração ideal segundo o CIVA.

Tabela 4.3 – Parâmetros de inspeção indicados pelo software CIVA

Canal	Distância (mm)	Ângulo	Frequência (MHz)
L1	85	45°	4
L2	81	45°	4
L3	98	60°	4
L4	98	60°	4
L5/L6	73	45°	4
L7/L8	96	60°	4
L9/L10	79	70°	4

Entretanto, no momento em que se iniciou a calibração do sistema de ultrassom com as configurações sugeridas pelo simulador CIVA, foi verificado que tais configurações não permitiriam que os canais detectassem de maneira eficiente os grafites refletoras para os quais estavam sendo calibrados.

Uma das razões para essa inconsistência pode ter sido a disparidade entre o ângulo de emissão do feixe sônico nominal do transdutor e o ângulo real de emissão do feixe do mesmo. Por se tratar de um sistema automatizado utilizado com relativa frequência até a manutenção, o desgaste da sapata provocado pelo contato direto com o tubo durante as inspeções ocasiona alteração no ângulo de emissão do feixe sônico do cabeçote. Alteração esta que, mesmo sendo de 1 ou 2 graus, deve ser acompanhada da variação na distância do transdutor ao centro do cordão de solda por provocar significativa alteração na resposta sônica, como mostra a Figura 4.16.

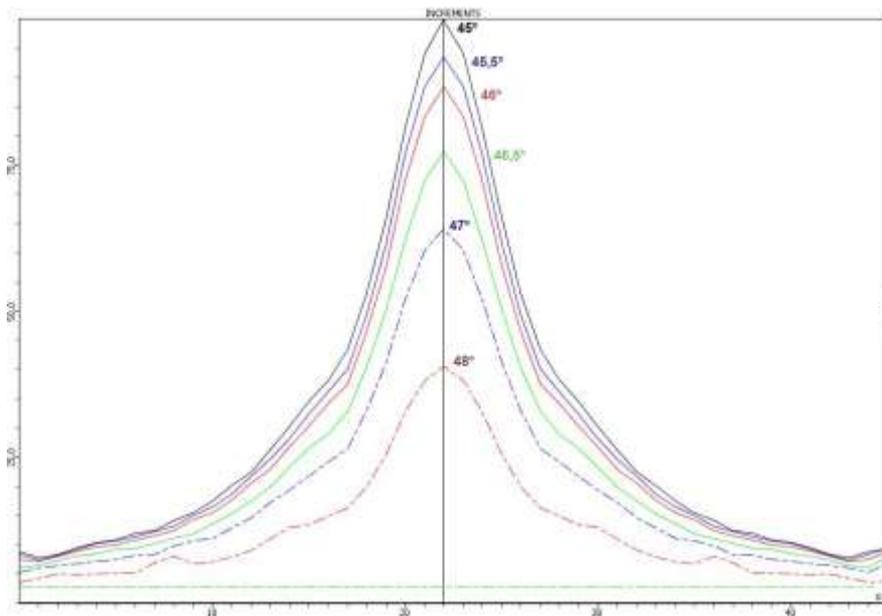


Figura 4.16 - Comparação entre amplitudes de diferentes ângulos de transdutores para um dado defeito.

Outro motivo que justificou a correção dos canais foi a ausência de transdutores com ângulos compatíveis com os sugeridos pelo CIVA. O canal L3, por exemplo, deveria ser de 60°, mas na prática o feixe é emitido a 56,5°.

Desta forma, os canais ultrassônicos foram alterados manualmente até que o transdutor conseguisse detectar o refletor correspondente. Portanto, os parâmetros de calibração do equipamento não foram as sugeridas pelo software, mas uma versão modificada. As configurações utilizadas nas inspeções finais podem ser observadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Configuração utilizada na nova rodada de inspeções

Canal	Distância (mm)	Ângulo	Frequência (MHz)
L1	80	45°	4
L2	80	45°	4
L3	84	56,5°	4
L4	84	56,5°	4
L5/L6	64	46°	4
L7/L8	63	61,5°	4
L9/L10	70	70°	4

4.4 – NOVA RODADA DE INSPEÇÕES

Uma vez calibrado o equipamento, novas inspeções foram feitas no tubo com os grafites. Usando a mesma metodologia, mas com parâmetros de calibração otimizados, foram realizadas 12 rodadas de inspeções aplicando um limiar de corte (patamar de detecção) entre detecção e não detecção de 50% de amplitude do sinal. O resultado das amplitudes está mostrado na Tabela 4.5, com destaque em marrom para os casos em que a amplitude ficou acima do patamar de detecção.

A partir do resultado das amplitudes da Tabela 4.5 novas curvas PoD puderam ser modeladas para melhor entendimento do sistema após modificação da calibração do sistema. Foi observado que, ocasionalmente, alguns canais detectavam defeitos de responsabilidade de outro canal e, com isso, não desempenharam suas funções da forma esperada. Essa provavelmente é a causa de probabilidades de detecção de alguns tipos de defeitos estarem baixas.

Tabela 4.5 – Resultado das amplitudes com a nova calibração do equipamento.

Destaque, em marrom, para os valores acima do Patamar de detecção.

Defeito	Amáx. P1	Amáx. P2	Amáx. P3	Amáx. P4	Amáx. P5	Amáx. P6	Amáx. P7	Amáx. P8	Amáx. P9	Amáx. P10	Amáx. P11	Amáx. P12	Amp. Média
1	42	45	45	45	45	44	40	41	41	47	46	49	44,2
2	89	87	92	100	100	91	88	93	88	88	85	92	91,1
3	100	100	100	100	50	100	100	100	100	100	100	100	95,8
4	63	57	53	64	54	63	58	52	57	51	55	51	56,5
5	100	100	100	100	100	100	100	98	100	100	100	100	99,8
6	44	44	47	43	42	37	40	38	39	41	42	37	41,2
7	42	42	49	39	42	40	39	35	39	40	41	49	41,4
8	48	53	54	55	47	48	49	53	39	53	53	53	50,4
9	42	42	42	44	46	40	44	47	45	47	48	42	44,1
10	45	48	46	47	48	48	46	43	45	53	50	45	47,0
1	48	48	46	47	47	31	47	48	47	48	45	46	45,7
12	49	47	49	49	51	51	48	48	51	46	50	48	48,9
13	45	46	42	39	38	44	42	41	47	45	44	39	42,7
14	78	87	85	83	82	80	77	69	84	75	82	70	79,3
40	49	46	46	48	47	49	45	48	47	46	49	49	47,4
42	45	46	46	44	47	47	38	47	46	42	41	43	44,3
55	40	36	37	39	40	37	42	40	40	40	35	40	38,8
57	47	47	48	49	49	49	48	44	48	49	49	48	47,9
59	43	41	46	42	45	49	45	40	42	44	44	44	43,8
61	34	36	42	37	47	46	44	35	46	39	41	35	40,2
63	42	40	44	42	41	48	47	41	46	38	46	43	43,2
76	41	44	42	46	43	43	44	49	44	42	46	43	43,9
77	49	46	64	57	49	70	49	47	53	43	44	48	51,6
78	61	38	33	36	36	36	39	57	65	37	62	56	46,3
79	49	45	45	45	47	45	47	45	44	45	45	46	45,7
80	49	51	49	60	40	48	46	48	43	49	51	49	48,6
81	48	63	37	59	60	60	64	63	43	61	61	63	56,8
82	92	73	80	92	82	88	95	88	83	60	78	70	81,8
83	38	37	37	43	40	42	43	48	47	46	42	46	42,4
84	37	39	38	38	37	36	38	38	38	35	37	38	37,4
85	29	31	29	30	33	30	30	31	29	30	30	29	30,1
86	36	37	40	36	39	42	39	35	33	37	36	37	37,3
87	27	25	25	27	26	28	24	25	26	26	28	25	26,0
88	77	30	33	38	34	27	32	28	31	30	29	30	34,9
90	100	39	76	71	76	72	80	76	62	45	69	31	66,4
91	34	41	43	29	28	37	32	33	34	33	34	42	35,0
92	31	29	28	27	26	28	26	30	28	31	28	29	28,4
94	37	38	36	34	40	33	30	33	29	38	38	48	36,2
95	35	39	39	72	35	40	36	37	47	98	39	39	46,3
96	34	35	37	45	34	39	33	31	48	44	38	39	38,1
97	83	86	88	94	84	90	91	89	70	35	88	81	81,6
98	34	38	37	34	39	40	40	33	40	40	37	42	37,8
99	38	35	41	100	44	57	68	82	74	99	79	45	63,5

Como a calibração era realizada em um Tubo Padrão com entalhes em posições diferentes das do corpo de prova, defeitos localizados em regiões complexas como na raiz do cordão tiveram a detecção comprometida.

No gráfico da Figura 4.17 é possível observar todos os papéis desempenhados pelos canais e quantas vezes, percentualmente, eles desempenham tais papéis.

Para compreender corretamente as informações do gráfico da Figura 4.17, considere o seguinte exemplo: em relação ao canal L1, em apenas 30% das inspeções realizadas o canal desempenha sua própria função. Em compensação, o L1 não desempenha a função de nenhum outro canal. Já a dupla L5/L6 desempenha sua função em apenas 20% das inspeções realizadas. Em 50% das inspeções a dupla detecta defeitos em outras regiões.

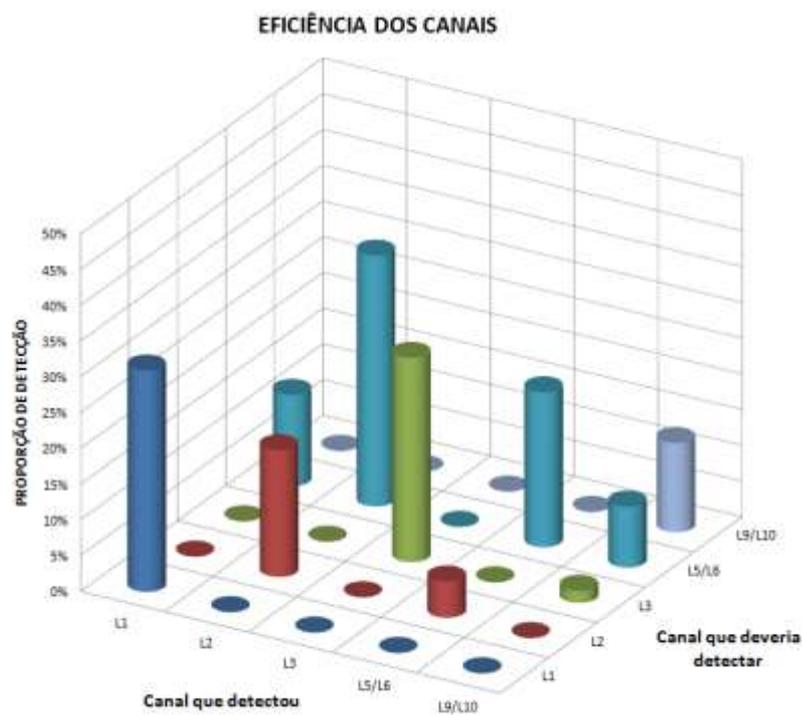


Figura 4.17 – Eficiência dos canais: Proporção de detecção de cada canal em relação ao canal responsável por detectar o defeito.

O fato de um canal detectar defeitos em regiões que não são de sua responsabilidade não é questionável, pois contribui para a melhora da PoD do sistema de modo geral. No entanto, o que ocorreu eventualmente durante as inspeções foi a detecção de defeitos por canais alternativos em uma proporção maior que o canal original. Por isso a alteração dos parâmetros de inspeção, para o tubo em questão, é justificada.

Em relação às curvas PoD, houve melhora na detecção para o caso do canal L1 e o mesmo passou a detectar com segurança defeitos com 3.5mm de altura, como mostra a Figura 4.18. Para os outros canais não houve melhora significativa no formato da curva.

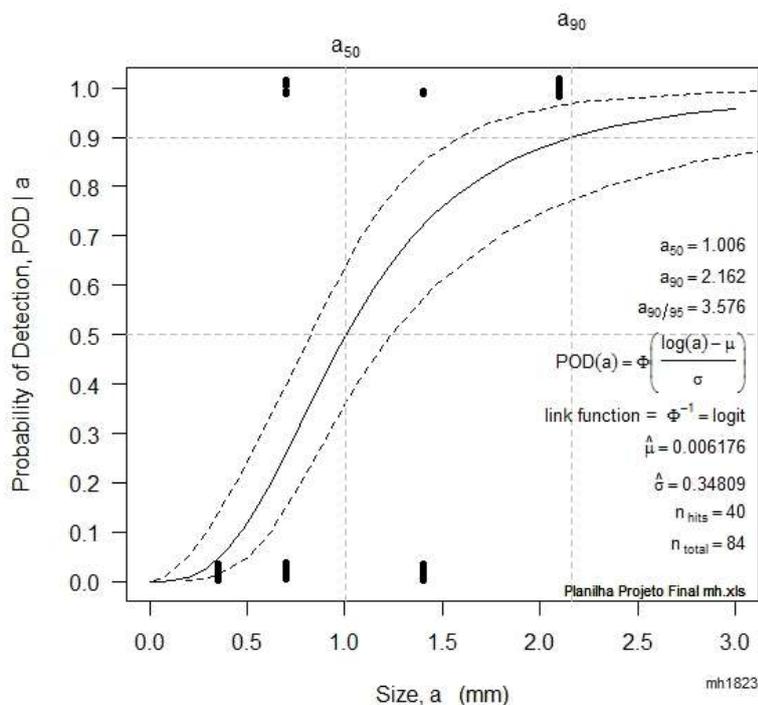


Figura 4.18 – Curva PoD da nova calibração considerando o sinal emitido pelo canal L1.

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

Através do estudo das inspeções por ultrassom automatizado e das análises de probabilidade de detecção, foi possível concluir que a resposta sônica do aparelho é fortemente dependente da altura do defeito, o que está de acordo com a pesquisa de *Krautkrämer* [20]. A relação entre o comprimento e a PoD se mostrou insuficiente, uma vez que o aumento do comprimento do defeito não ocasionou aumento da probabilidade de detecção.

De forma geral, diferentes tipos de descontinuidades apresentaram diferentes probabilidades de detecção. Defeitos do tipo falta de fusão (FF) e falta de penetração (FP) apresentaram PoDs médias mais baixas que os defeitos superficiais longitudinais (TSL) e defeitos na ZTA. Analogamente, diferentes canais possuem diferentes probabilidades de detecção, com isso, a PoD de cada canal depende da região do cordão de solda para o qual o mesmo está focado.

Como a calibração era realizada em um Tubo Padrão com entalhes em posições diferentes das do CP, defeitos localizados em regiões complexas como na raiz do cordão tiveram a detecção comprometida. A falta de repetibilidade entre as passadas evidencia a necessidade de aprimorar alguns aspectos, como o alinhamento dos canais com o cordão ou a velocidade das inspeções, por exemplo. Em particular, os canais L4, L7 e L8 apresentaram desempenho muito inferior ao esperado.

O simulador CIVATM se mostrou capaz de reproduzir resultados experimentais e, desta forma validar sua contribuição na etapa de planejamento do ensaio ultrassônico. Ademais, foi possível perceber através do software que pequenas variações nos ângulos dos transdutores influenciaram mais do que era previsto na resposta do aparelho de ultrassom estudado.

A partir deste estudo foi possível concluir que a curva PoD é uma ferramenta poderosa e de custo relativamente baixo quando se deseja avaliar a confiabilidade de uma determinada técnica não destrutiva. Através destas curvas foi possível conhecer as variáveis que tem maior influencia nas inspeções para, posteriormente, aprimorar o sistema estudado.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Verificação computacional da eficiência de transdutores

- A partir do estudo acima, é possível verificar computacionalmente se de fato canais de baixa eficiência estão detectando refletores que não são de suas responsabilidades através de comparação da amplitude dos sinais sônicos.

- Relevância dos parâmetros experimentais para o planejamento de inspeção

- Variando alguns parâmetros de inspeção através de melhorias sugeridas por análise computacional, foram obtidos resultados otimizados de detecção quando tais melhorias foram aplicadas em inspeções práticas.

- Sensibilidade de resposta sônica segundo variação do ângulo do transdutor

- Variando alguns décimos de grau, é possível demonstrar computacionalmente que a amplitude da resposta sônica obtida no ensaio de US pode ser tanto amplificada como reduzida de forma considerável.

- Sensibilidade de resposta sônica segundo variação do index

- Variando alguns centímetros da distância do transdutor em relação ao eixo longitudinal da solda, é possível demonstrar computacionalmente que a amplitude da resposta sônica obtida no ensaio de US pode ser tanto amplificada como reduzida de forma considerável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GEORGIU, G. A., *Probability of Detection (PoD) curves - Derivation, applications and limitations*, Jacobi Consulting Limited for the Health and Safety Executive 2006;

[2] SANTIN, J. Luiz, **ULTRASSOM Técnica e aplicação**;

[3] ANDREUCCI, Ricardo, **Ensaio por Ultrassom**, ABENDE, Ed. Jul. 2011;

[4] SILVA, I. C., “Avaliação da Técnica do Tempo de Percurso da Onda Difrada no Dimensionamento de Descontinuidades”. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.

[5] SILVA, S.G., *Técnica Ultra-Sônica do Tempo de Percurso da Onda Difrada na Detecção e Dimensionamento de Descontinuidades em Cordões de Solda de Aço*, Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

[6] CARVALHO, A. A., *Detecção de Descontinuidades pela Técnica Ultra-sônica Pulso-eco Utilizando Um Sistema Multicanal*. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

[7] **Nondestructive Evaluation and Quality Control**, ASM Handbook, 3^a edição, Vol. 17, 1994.

[8] **American Society for Nondestructive Testing**, Nondestructive Testing Handbook, 2^a Edição, Vol. 7, 1991.

[9] WALL, M., WEDGWOOD, F. A., BURCH, S., “Modeling of NDT Reliability (POD) and Applying Corrections for Human Factors”, **7th ECNDT - European Conference on Nondestructive Testing**, Copenhagen, May, 1998.

[10] CARVALHO, A. A., *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, 2004.

- [11] NTIAC Non-destructive Evaluation (NDE) capabilities data book, 3rd ed., November 1997, NTIAC DB-97-02, **Non-destructive Testing Information Analysis Centre**.
- [12] FORSYTH, D. S., FAHR A., LEEMANS, D. V., et al., “Development of POD from In-Service NDI Data”, **Quantitative Nondestructive Evaluation**, Iowa, July, 2000.
- [13] BURROWES, M., *Determinação do Limite de Detecção de Defeitos em Aduoras Através de Técnicas Ultrassônicas*. Projeto Final de Curso, Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, 2013
- [14] RUMMEL, W D: ‘**Recommended practice for a demonstration of non-destructive evaluation (NDE) reliability on aircraft production parts**’. Materials Evaluation Vol. 40 August 1982.
- [15] BARTHOLO, P. U., *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, 2008
- [16] WALL M., WEDGWOOD F. A., BURCH S., “Modelling of NDT Reliability (POD) and applying corrections for human factors”, Table of Contents ECNDT, session: Reliability and Validation, 1998;
- [17] MEEKER William Q., “PoD Tutorial Part I - Dealing with Hit/Miss Data”, Center for Nondestructive Evaluation Department of Statistics Iowa State University.
- [18] MEEKER William Q., “PoD Tutorial Part II – Review of what versus a Strategies”, Center for Nondestructive Evaluation Department of Statistics Iowa State University.
- [19] OGILVY, J. A., “Model for Predicting Ultrasonic Pulse-echo Probability of Detection”, NDT & E International, Vol. 26, N° 1, pp. 19-29, 1993.
- [20] KRAUTKRÄMER, J., “Determination of the size of defects by the ultrasonic impulse echo method”, Vol. 10, Cologne, June, 1959.