

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE
MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA
PROJETO FINAL DE CURSO

**AVALIAÇÃO DE SENSIBILIDADE DA TÉCNICA DE ULTRASSOM
ATRAVÉS DE CURVAS ROC**

Fábio Calé da Silva

**Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello
Co-orientador: Luís Marcelo Marques Tavares**

Setembro de 2011

**AVALIAÇÃO DE SENSIBILIDADE DA TÉCNICA DE
ULTRASSOM ATRAVÉS DE CURVAS ROC**

Fábio Calé da Silva

PROJETO FINAL DE CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

Aprovado por:

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc. - COPPE/UFRJ

Prof. Luis Marcelo Marques Tavares, Ph.D - COPPE/UFRJ

Sérgio Damasceno Soares, D.Sc. - CENPES/PETROBRAS

Pablo Uchôa Bartholo, M.Sc. - COPPE/UFRJ

**RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2011**

Dedico este trabalho aos meus familiares. Não esquecendo o grande amigo Pablo Uchôa Bartholo.

AGRADECIMENTO

Ao professor João Marcos Alcoforado Rebello pela oportunidade do projeto e orientação.

Ao professor Luís Marcelo Marques Tavares pela ajuda e orientação ao meu projeto.

Ao Engenheiro Sérgio Damasceno Soares por participar da minha banca de avaliação.

À equipe de não destrutivos do LNDC pela colaboração e auxílio no desenvolvimento experimental do meu projeto.

Ao professor Miranda que muito contribuiu na minha formação pessoal e acadêmica durante anos de trabalhos em projetos.

Aos professores Maria Cecília e Luiz Carlos Pereira pela orientação acadêmica e muitas conversas durante meu curso de graduação.

Ao professor Fernando Amorim pela oportunidade de me apresentar outra face da engenharia.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO -----	1
CAPÍTULO 2: OBJETIVO -----	3
CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	4
3.1) Técnica de Ultrassom -----	4
3.1.1) Princípio ultrassônico -----	4
3.1.2) Geração e tipos de ondas acústicas -----	5
3.1.3) Técnica de ultrassom pulso-eco -----	5
3.1.4) Ultrassom automatizado (AUT) -----	6
3.1.5) Aplicação do ultrassom na indústria -----	7
3.2) Defeitos em juntas soldadas -----	7
3.2.1) Falta de fusão -----	7
3.2.2) Falta de penetração -----	8
3.3) Confiabilidade de ensaios não destrutivos -----	9
3.3.1) Introdução -----	9
3.3.2) Fatores que influenciam a confiabilidade -----	11
3.4) Probabilidade de detecção (PoD) -----	12
3.4.1) Introdução -----	12
3.4.2) Curvas PoD -----	12
3.4.3) Modelagem de curvas PoD -----	13
3.5) Probabilidade de falso alarme (PFA) -----	14
3.6) Curvas ROC -----	15
3.6.1) Introdução -----	15
3.6.2) Curvas ROC -----	16
CAPÍTULO 4: MATERIAIS E METODOLOGIA -----	22
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	33
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES -----	47
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA -----	49

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As técnicas de ensaios não destrutivos são utilizadas em diversas áreas do conhecimento e são cada vez mais importantes na avaliação da integridade estrutural de equipamentos industriais. As técnicas permitem a localização e dimensionamento de defeitos contidos internamente ou superficialmente no material analisado.

A técnica de ultrassom, com os seguidos avanços tecnológicos visando à automatização do sistema, teve grande desenvolvimento com o objetivo principal de minimizar os erros de detecção na inspeção. No caso da inspeção manual, parte dos erros atribuídos aos resultados da inspeção estão relacionados ao inspetor, ou seja, estão relacionados à fatores humanos como erros de calibração, acuidade mental e capacidade de realização da inspeção.

A confiabilidade de um ensaio não destrutivo consiste na capacidade do ensaio em detectar, classificar e avaliar desvios existentes nos resultados da inspeção.

Através de uma análise estatística é possível quantificar a confiabilidade de detecção de uma descontinuidade para uma técnica de ensaio não destrutivo END utilizada. Algumas das ferramentas utilizadas para essa análise estatística são as curvas probabilidade de detecção, PoD e curvas ROC *receiver operating characteristic*.

Probabilidade de detecção (PoD) é o método mais comum para quantificar a confiabilidade de uma técnica de END e, através de uma metodologia, é possível estimar a capacidade de detecção de um método de inspeção, em função do tamanho do defeito. Pelo fato do ultrassom ser uma técnica que trabalha com sinais de resposta, alguns destes podem ser interpretados de maneira equivocada, gerando erros na avaliação final. Esses sinais estão relacionados a probabilidade de falso alarme (PFA) que associados aos valores de PoD são utilizados para o estudo de curvas ROC.

ROC *Receiver Operating Characteristic* avalia a confiabilidade de uma técnica através de uma análise da sua sensibilidade. Quando trabalhamos com uma alta sensibilidade, os sinais de mais baixa amplitude (ruídos) são captados. Curvas ROC podem mostrar taxas de acertos e alarmes falsos dos classificadores, avaliando desta maneira a sensibilidade da técnica. Possuem um sistema variando de 0 a 1 onde

descreve uma relação entre a fração de verdadeiros positivos (PoD) e a fração de falsos positivos (PFA).

Este trabalho apresenta um estudo de confiabilidade em cordões de solda circunferências em dutos de aço API X70, contendo defeitos de falta de fusão e falta de penetração, inspecionados através da técnica ultrassônica manual.

Devido a necessidade de grande precisão nas dimensões dos defeitos, foram utilizadas técnicas auxiliares: ultrassom automatizado, ToFD e radiografia, a fim de obter um gabarito com o posicionamento e dimensionamento de todos os defeitos do duto.

Com esse banco de dados criado, é feita uma avaliação da sensibilidade da técnica ultrassônica manual e automatizada.

CAPÍTULO 2

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a sensibilidade da técnica ultrassônica manual pulso eco em dutos de aço API X70 sobre a influência de diferentes tipos de defeitos com diferentes alturas. Com o banco de dados para a técnica ultrassônica manual e automatizada foi possível fazer uma comparação entre as técnicas. Outras técnicas de END foram utilizadas como ferramenta para detecção e localização de defeitos, são elas, radiografia e ToFD.

Esse trabalho é parte de um estudo de mestrado desenvolvido que estabelece uma metodologia para avaliação da integridade de dutos API X70 através de um estudo da confiabilidade do ensaio ultrassônico aplicada à significância de defeitos através da mecânica da fratura.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Técnica de Ultrassom

3.1.1) Princípio ultrassônico

O ensaio por ultrassom é caracterizado como um ensaio não destrutivo que tem por finalidade a detecção de defeitos ou descontinuidades internas presentes em materiais metálicos sejam eles ferrosos ou não ferrosos e materiais não metálicos também.

O ensaio é feito utilizando ondas mecânicas, com frequência acima de 20KHz, que são aplicadas no meio utilizado para a inspeção. Essas ondas ultrassônicas percorrem um meio elástico e, ao encontrarem com uma descontinuidade ou falha interna, são refletidas. Através de aparelhos adequados, podemos detectar essas reflexões da onda provenientes da peça, nos permitindo localizar e interpretar essas descontinuidades. A figura 3.I explica esse fenômeno. Desta maneira, o ensaio ultrassônico, assim como os demais ensaios não destrutivos, visam diminuir o grau de incerteza nos resultados de inspeções.

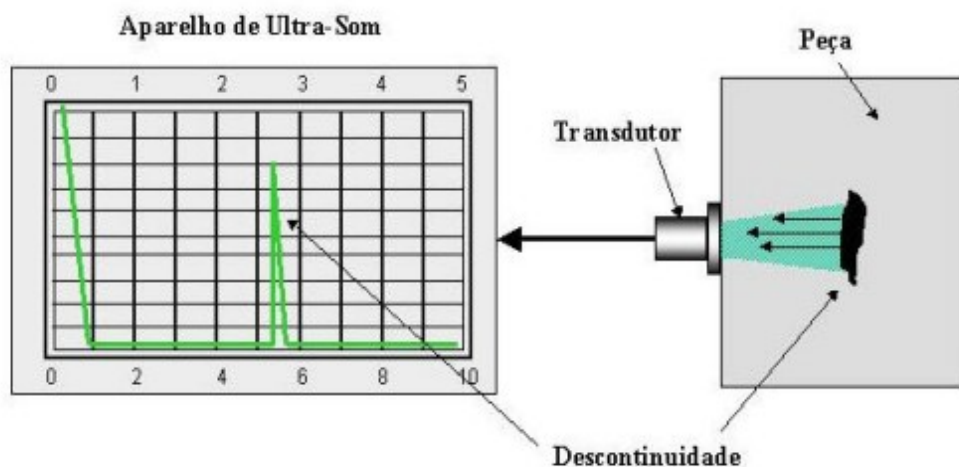


Figura 3.I – Princípio básico da inspeção de materiais por ultrassom [1]

3.1.2) Geração e tipos de ondas acústicas

As ondas ultrassônicas são geradas através de um elemento emissor que vibra com uma determinada frequência. O elemento emissor e o receptor são chamados de transdutores ou cabeçotes. Diversos materiais apresentam o efeito piezoeletrico. O cristal piezoeletrico pode transformar a energia elétrica em oscilação mecânica e transformar a energia mecânica em elétrica[1].

Ondas mecânicas são compostas de oscilações de partículas discretas no meio em que são propagadas. A oscilação das partículas em torno da posição de equilíbrio é devida à passagem de energia acústica.

Assumindo que o meio em estudo é elástico, isto é, as partículas que o compõem podem oscilar em qualquer direção, podemos classificar as ondas acústicas em três categorias:

- Ondas longitudinais ou ondas de compressão: são ondas cujas partículas oscilam na direção de propagação da onda. Elas podem ser transmitidas a sólidos, líquidos e gases. Esta onda possui alta velocidade de propagação.

- Ondas transversais ou ondas de cisalhamento: em ondas transversais, as partículas do meio vibram na direção perpendicular à de propagação. Durante a vibração, os planos de partículas mantêm-se na mesma distância um do outro, movendo-se apenas verticalmente. Possuem velocidades de propagação de aproximadamente 50% do valor da onda longitudinal.

Esse tipo de onda se propaga em meio sólido, sendo incapazes de se propagarem em meios líquidos e gasosos devido às características das ligações entre as partículas.

- Ondas superficiais ou ondas de Rayleigh: esse tipo de onda se propaga na superfície dos sólidos. Sua aplicação se restringe a finas camadas de material que recobrem outros materiais. Possuem valores de velocidade de propagação de aproximadamente 10% inferior que a de uma onda transversal.

3.1.3) Técnica de ultrassom pulso-eco

A técnica pulso-eco utiliza apenas um transdutor que é responsável pela emissão e recepção das ondas ultrassônicas que se propagam pelo material. A utilização desta técnica permite determinar a profundidade da descontinuidade, suas dimensões e sua localização na peça. A figura 3.II ilustra a técnica pulso-eco.

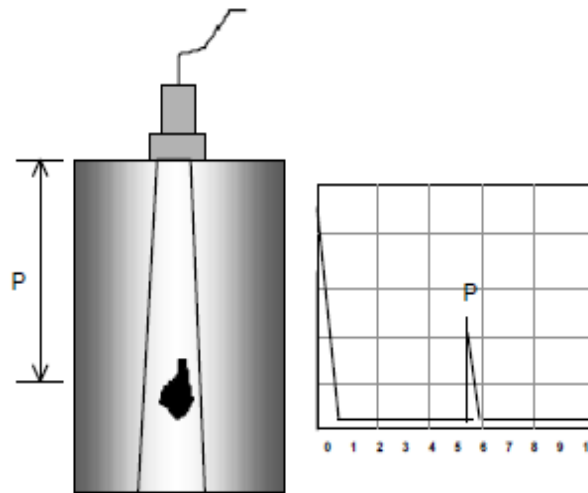


Figura 3.II – Técnica pulso-eco [1]

Esta técnica permite a detecção de descontinuidades muito pequenas que necessitam de uma alta sensibilidade no ensaio. Outra vantagem que podemos descrever é sua precisão na detecção de descontinuidades logo abaixo da superfície[1].

Como demonstração, a figura 3.III apresenta a técnica pulso-eco para a inspeção de tubos de aço onde é possível notar o sinal de resposta no visor do aparelho utilizado.

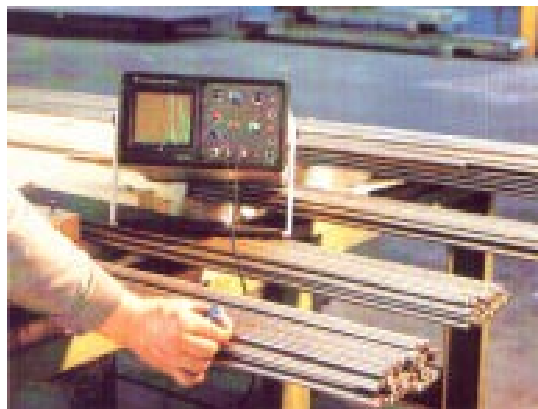


Figura 3.III – Inspeção em barras pela técnica pulso-eco[1]

3.1.4) Ultrassom Automatizado AUT

A técnica ultrassônica automatizada foi desenvolvida para realização de inspeções com maior rapidez e obtenção de resultados com maior confiabilidade. Foi rapidamente aplicado em instalações *off-shore* ou de grande porte, como vasos de pressão, sendo utilizada desde o período de instalação do equipamento e posteriormente

em serviços de manutenção. A figura 3.IV apresenta um exemplo de técnica automatizada[2].



Figura 3.IV – Inspeção ultrassônica automatizada em um submarino

3.1.5) Aplicação do ultrassom na indústria

Embora a primeira investigação da aplicação de energia sônica para atravessar um material metálico tenha acontecido no final da década de 20, o ensaio ultrassônico somente iniciou sua aplicação na indústria em 1945. Na indústria moderna, principalmente nas áreas de caldeiraria e estruturas marítimas, o ensaio ultrassônico constitui uma ferramenta fundamental para garantir a qualidade das operações e principalmente das juntas soldadas.

3.2) Defeitos em juntas soldadas

3.2.1) Falta de fusão

Falta de fusão é a ausência de união por fusão entre passes adjacentes de solda ou entre a solda e o metal de base. Este defeito pode ser causado por um aquecimento inadequado do eletrodo, uso de uma energia de soldagem muito baixa, soldagem em chanfros muito apertados e da falta de limpeza na peça, isto é, presença de uma camada de óxido espessa o suficiente para dificultar a fusão do metal de base. Esta descontinuidade é um concentrador de tensões e pode favorecer a formação de trincas.

Em peças de responsabilidade, a existência de falta de fusão, não pode ser tolerada, exigindo-se a remoção defeituosa e a sua ressoldagem[3]. A figura 3.V ilustra a falta de fusão.



Figura 3.V – Falta de fusão

3.2.2) Falta de penetração

Falta de penetração é a falha em se fundir e encher completamente a raiz da junta. Este defeito pode ser causado pela manipulação incorreta do eletrodo, projeto inadequado da junta, escolha de eletrodo com diâmetro muito grande, uso de baixa energia de soldagem e velocidade de soldagem muito alta. Além disto, este defeito pode causar uma redução da seção útil da solda, além de ser um concentrador de tensões[3]. A figura 3.VI ilustra a falta de penetração.

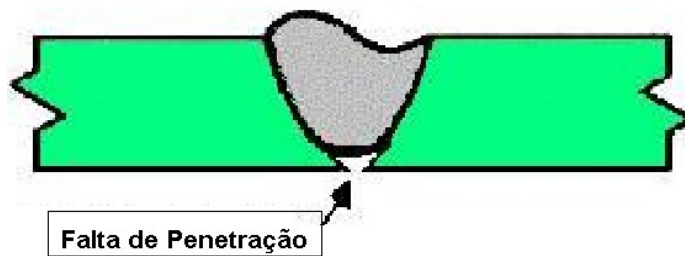


Figura 3.VI – Falta de penetração

3.3) Confiabilidade de ensaios não destrutivos

3.3.1) Introdução

A confiabilidade de um ensaio não destrutivo consiste na capacidade do ensaio em detectar, classificar e avaliar desvios existentes em corpos de prova. Os principais elementos da confiabilidade são: a capacidade intrínseca do sistema, o efeito de parâmetros de aplicação e os fatores humanos. Para medir a confiabilidade podemos utilizar alguns métodos, como PoD e ROC.

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 específico”. A probabilidade de detecção geralmente é apresentada em função do tamanho do defeito, embora seja função de muitos outros parâmetros, como: geometria, tipo de falha, material, técnica de END utilizada, condições de ensaio, pessoal e outros[4].

A importância destas inspeções e a confiabilidade de seus resultados foram objetivo de muito estudo desde as décadas de 60 e 70, quando muitos trabalhos foram publicados pela indústria aeronáutica.

Inspeções repetidas de um defeito de mesmo tipo ou mesmo tamanho, não necessariamente apresentarão um resultado consistente de detecção e não detecção. Por esse motivo, existe uma diferença nos resultados de detecção para cada tipo e cada tamanho de defeitos e, justamente por isso, a capacidade de detecção é expressa em termos de estatísticos. Um caso que explica essa situação mostra que a Forças Aérea Americana realizou um estudo com 60 operadores usando correntes parasitas para uma mesma condição de trabalho, em 41 trincas conhecidas em furos de 1,5m de comprimento em um equipamento de caixa de asa. Os resultados são mostrados na figura 3.VII, estão em termos de porcentagem de detecção (número de vezes que o defeito foi detectado pelo número total de inspeções)[4].

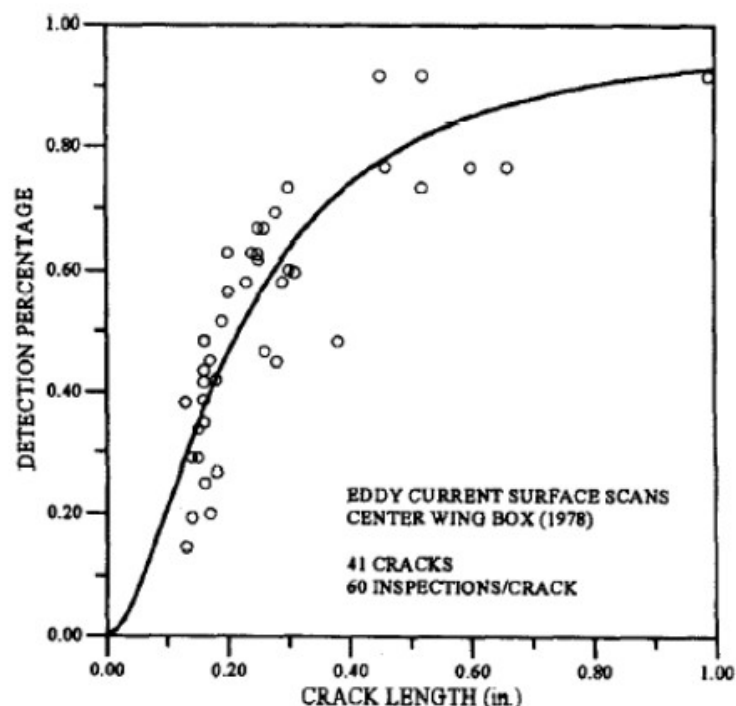


Figura 3.VII – Ensaio de percentual de detecção para o ensaio de corrente parasita[4]

As chances de detectar a trinca são diretamente proporcionais com o tamanho da trinca. Além disso, nenhuma trinca foi 100% detectada e diferentes trincas com mesmo tamanho apresentam uma pequena diferença nos resultados de porcentagem de detecção.

A fim de assegurar a integridade estrutural de componentes críticos na indústria aeroespacial, as curvas PoD não tinham como principal finalidade detectar os menores tamanhos de defeitos em um ensaio não destrutivo. Porém, do ponto de vista da mecânica da fratura, era mais apropriado saber qual o maior tamanho de defeito que pode não ser detectado[4].

Em 1969, a National Aeronautic and Space Administration (NASA) iniciou um programa para determinar o maior defeito que poderia não ser detectado para os vários métodos de ensaios não destrutivos que estavam sendo usados para a produção do ônibus espacial. A metodologia utilizada pela NASA foi logo adotada pela Força Aérea dos Estados Unidos, assim como o setor de aviação comercial. Nas últimas duas décadas mais indústrias adotaram métodos semelhantes de confiabilidade para técnicas de ensaios não destrutivos com base em PoD[4].

Após anos de pesquisas e métodos aplicados, durante o *1st European-American Workshop* em 1997, foi adotado um modelo de confiabilidade que relaciona os seus principais elementos, mencionados no início desta seção.

Para cada técnica de ensaios não destrutivos utilizada, obtêm-se um valor de confiabilidade.

O modelo é apresentado abaixo:

$$R \equiv f(IC) - g(AP) - h(HF) \quad \text{Equação 3.1 [5]}$$

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.).

3.3.2) Fatores que influenciam a Confiabilidade

Muitos são os fatores que influenciam a avaliação sobre a detecção ou não detecção de uma descontinuidade. Inspeções diferentes de um defeito não necessariamente apresentam um mesmo resultado referente aos sinais de resposta. Este fator está relacionado à capacidade intrínseca do sistema, o efeito de parâmetros de aplicação e os fatores humanos.

Como primeiro fator de influência a calibração do equipamento é de grande importância, pois utilizando um mesmo equipamento, podemos ter diferentes sinais para um mesmo defeito.

Outro fator que influência está relacionado ao material. Se considerarmos o processo de fabricação do material, para cada processo podemos obter diferentes valores de atenuação sônica. A geometria da peça a ser inspecionada e a orientação dos tipos de defeitos existentes também apresentam influência na avaliação de detecção do defeito.

Relacionado ao inspetor, sua acuidade mental e seu estado emocional influenciam de maneira efetiva a avaliação dos resultados de inspeção. Outro fator que influencia está relacionado a sua capacitação em executar o ensaio.

3.4) Probabilidade de detecção (PoD)

3.4.1) Introdução

Como visto na seção 3.3.1, a probabilidade de detecção geralmente é apresentada em função do tamanho do defeito.

Durante a década de 80, chegou-se a um modelo mais geral para a curva de PoD, em função do tamanho de defeito "a". Muitas análises de dados de confiabilidade de ensaios não destrutivos indicaram que a função PoD(a) poderia ser modelada pela distribuição cumulativa "log normal"[4].

3.4.2) Curvas PoD

Probabilidade de detecção (PoD) é o método mais comum para quantificar a confiabilidade de uma técnica de END e através de uma metodologia é possível estimar a capacidade de detecção de um método de inspeção, em função do tamanho do defeito.

A curva PoD é uma curva matemática semelhante a uma função cumulativa de probabilidades. Seu valor varia de 0 e 1 e essa função é uma distribuição de probabilidades de detecção para diferentes tamanhos de defeitos.

Na figura 3.VIII temos um exemplo de curva PoD.

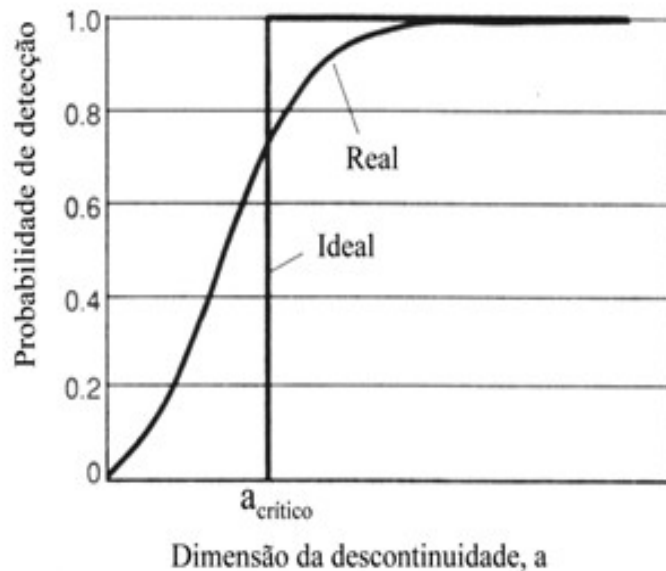


Figura 3.VIII – Comparação entre uma curva PoD ideal e real[5]

Para o caso da curva real, o valor crítico para a dimensão da descontinuidade ($a_{\text{crítico}}$) é bem definido. Valores inferiores a dimensão crítica apresentam probabilidade de detecção igual a 0 e valores superiores a dimensão crítica apresentam PoD igual a 1, ou seja, detecção e não detecção. Já para o caso da curva real, são apresentados valores intermediários de PoD onde a probabilidade varia de acordo com o tamanho do defeito.

Com os estudos atuais, já podem ser encontradas algumas metodologias de construção de curvas PoD. Geralmente as curvas podem ser construídas de duas maneiras: com uma base de dados experimentais ou através de modelagem matemática. Lembrando que ambas necessitam de bancos de dados de inspeção para construção das curvas PoD e um grande volume de dados influencia diretamente em melhores resultados de confiabilidade.

Existem também os casos de curvas geradas por simulação computacional onde não seria necessário nenhuma inspeção real.

3.4.3) Modelagem de curvas PoD

A modelagem matemática de curvas PoD é muito utilizada devido a sua simplicidade e baixo custo. Outra característica se deve ao fato de existirem poucos dados sobre probabilidade de falso alarme, sendo o modelo a única forma de se obter esses dados[4].

Existem dois métodos para analisar a confiabilidade dos dados e desenvolver uma curva PoD(a), isto é, probabilidade em função do tamanho do defeito a . Originalmente os resultados dos ensaios não destrutivos eram apenas registrados em função da detecção ou não detecção dos defeitos. Este método é chamado de *hit/miss*, os dados são registrados em termos de detecção (*hit*) e não detectado (*miss*) do defeito.

O segundo método, \hat{a} versus a , temos uma informação referente ao sinal de resposta. Se o sinal de resposta puder ser interpretado como função do tamanho do defeito, esse dado é denominado \hat{a} (“a hat em inglês”)[4].

Os dois métodos de avaliação de dados podem ser utilizados na modelagem da curva PoD, porém os resultados são diferentes se aplicarmos os dois métodos de análise para o mesmo conjunto de dados. Para que a avaliação tenha um resultado preciso, é necessário um mínimo de 29 pontos para se obter qualquer valor de PoD com 95% de certeza.[4]

A equação 3.2 é um exemplo de muitas equações que são utilizadas para a modelagens matemáticas da curva PoD.

$$PoD(a) = \frac{e^{\left(\frac{\log a - m}{\sigma}\right)}}{1 + e^{\left(\frac{\log a - m}{\sigma}\right)}} \quad \text{Equação 3.2 [5]}$$

Onde:

a é o tamanho do defeito;

m é a média dos tamanhos dos defeitos;

σ é o desvio padrão dos tamanhos de defeitos.

3.5) Probabilidade de Falso Alarme (PFA)

Probabilidade de falso alarme é a fração de inspeções que indicam a presença de descontinuidades onde não existem. O falso alarme geralmente é obtido pelo nível de ruído do sistema e pelo limiar do sinal adotado que serve como filtro para os sinais irrelevantes[6]. Em alguns casos, quando o limiar se aproxima do nível de ruído, existe um risco, pois uma descontinuidade pode ser mal interpretada e confundida com um ruído, logo não sendo identificada. A figura 3.IX mostra a aplicação de um limiar de 40%, ou seja todos os sinais que ultrapassam esse limiar podem ser considerados defeitos porém nem sempre isso é verdadeiro.

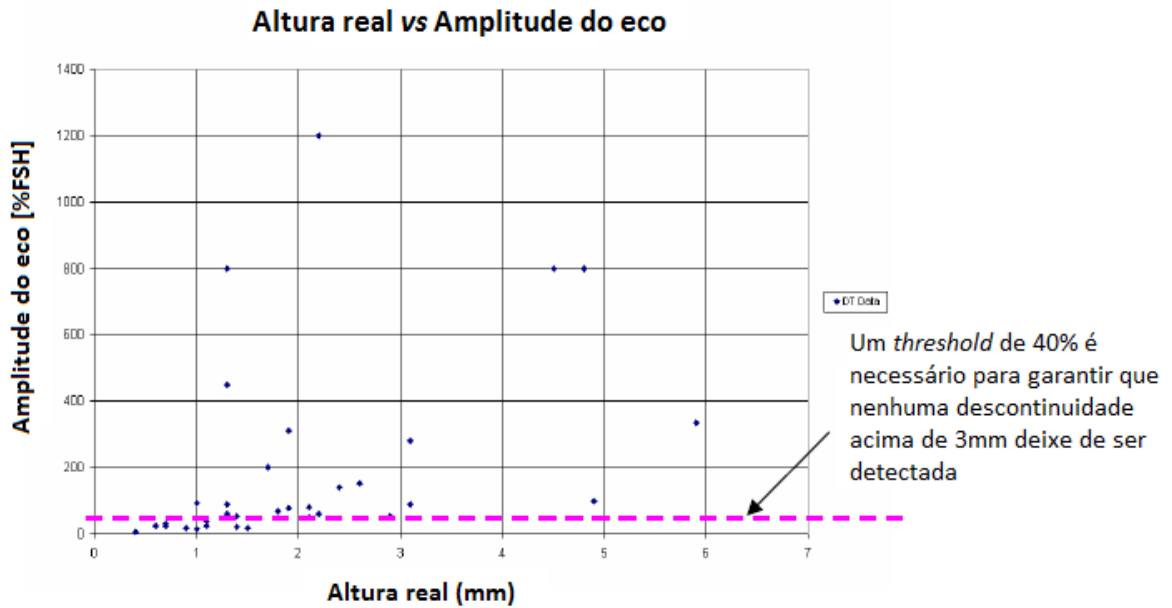


Figura 3.IX – Aplicação do limiar inferior [7]

A detecção de falsos alarmes, sinais de resposta que são interpretados como uma descontinuidade, podendo gerar problemas quanto ao custo de manutenções e eventualmente pausas na produção.

Sinais que resultam em falsas indicações são freqüentes em ensaios que produzem sinais de resposta, como o ensaio ultrassônico.

Com os sinais de alarmes falsos, podemos também classificar a fração de descontinuidades inexistentes e que são detectadas. Neste caso, recebem o nome de falso positivo (FP). A relação entre os dados de PoD e PFA resultam na curva ROC[8].

3.6) Curvas ROC

3.6.1) Introdução

ROC (receiver operating characteristic) é uma técnica para visualizar, avaliar, organizar e selecionar classificadores baseado em suas performances.

Essa curva foi primariamente desenvolvida na década de 50 e teve origem na teoria de detecção de sinal. A detecção de sinais eletromagnéticos na presença de ruídos foi analisada em 1940 como um problema de teste de hipótese estatística. O ruído foi identificado como sendo uma hipótese nula. Já quando identificado ruído mais sinal era associado à hipótese alternativa[9].

Nas décadas de 50 e 60, as curvas ROC foram utilizadas para avaliar a detecção de sinais em radar e na psicologia sensorial. Embora somente recentemente tenha se tornado comum o seu uso na área médica, foi aplicada pela primeira vez em medicina, na década de 60. A potencial utilidade da análise ROC em avaliar diagnósticos foi desde então utilizada por vários autores, sendo aplicada com sucesso a uma grande variedade de testes de diagnósticos[9, 10].

3.6.2) Curvas ROC

Curvas ROC são ferramentas que avaliam a sensibilidade da técnica. Por ser uma técnica que trabalha com detecção de sinais, é baseada em duas quantidades, uma designada por fração de verdadeiros positivos e outra designada por fração de falsos positivos. Desta maneira, existem quatro possíveis sinais de retorno, que podem ser classificados como:

- Verdadeiro positivo (VP): para o caso da descontinuidade existir e ser detectada;
- Falso positivo (FP): para o caso da descontinuidade não existir e ser detectada;
- Verdadeiro negativo (VN): para o caso da descontinuidade não existir e não ser detectada;
- Falso negativo (FN): para o caso da descontinuidade existir e não ser detectada.

A figura 3.X apresenta as quatro possibilidades de sinais de retorno, mencionados acima, que o ensaio pode apresentar.

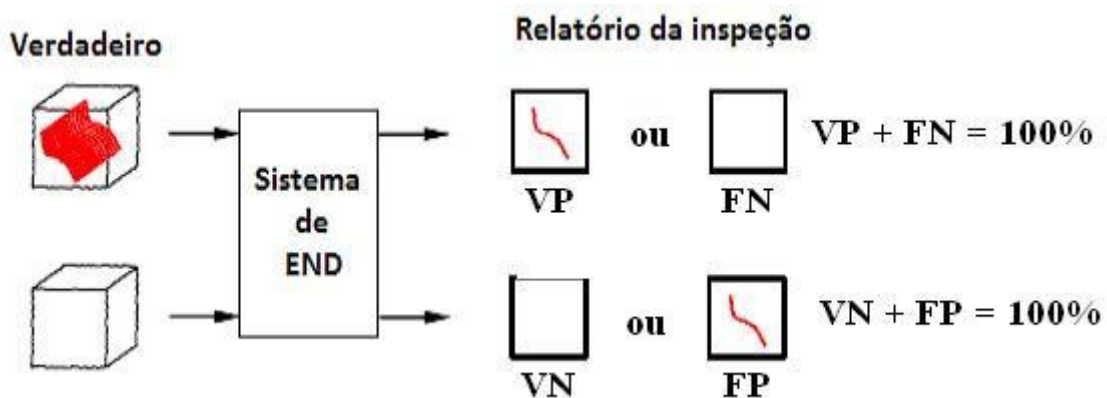


Figura 3.X – Esquema dos quatro sinais possíveis de retorno [11]

Como já citado, curvas ROC apresentam uma relação entre a fração de verdadeiros positivos (PoD) e a fração de falsos positivos (PFA) em um sistema que varia de 0 a 1. A figura 3.XI apresenta essa curva.

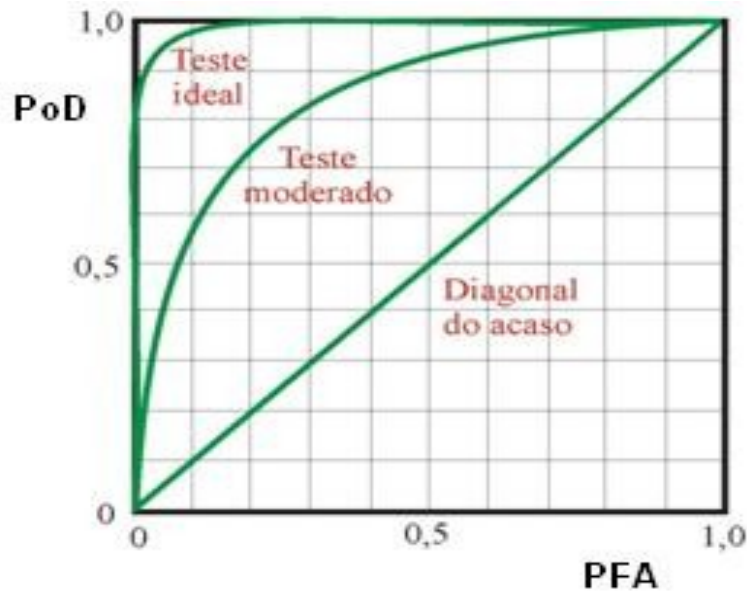


Figura 3.XI – Curva ROC

Para o caso do sistema utilizado apresentar a mesma proporção de PoD e PFA, dizemos que o resultado apresentado é função do acaso, ou seja, 50% de probabilidades. No caso de uma curva ideal, são necessários valores de PoD superiores a 95% e valores de PFA próximo de zero, ou seja, um resultado de confiabilidade muito expressivo. O teste moderado apresenta valores próximos dos valores conseguidos através de resultados experimentais, ou seja, técnicas manuais e automatizadas. Desta maneira, podemos avaliar as curvas ROC através das áreas abaixo das curvas. Quanto maior a área sob a curva, melhor o desempenho médio e maior a confiabilidade da técnica, como é apresentado na figura 3.XII a seguir.

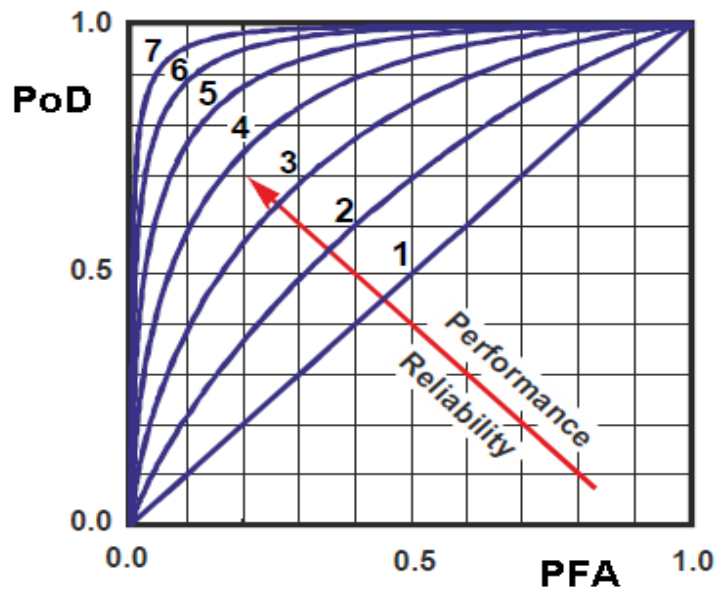


Figura 3.XII - Aumento da confiabilidade[11]

É possível que, em algumas regiões do espaço ROC, um classificador possua resultados superior ao outro. Esse caso está diretamente associado à amplitude dos sinais captados e sua avaliação estatística que será apresentada no próximo capítulo que fala sobre a metodologia utilizada. A figura 3.XIII apresenta essa abordagem.

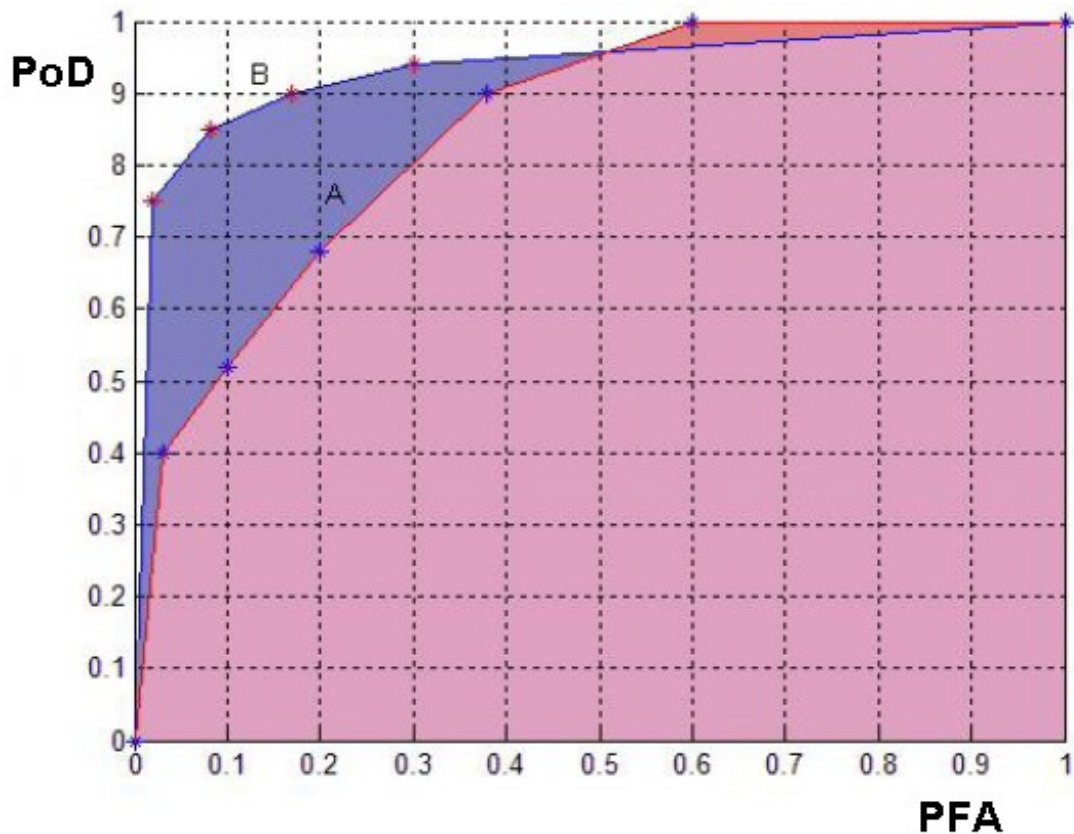


Figura 3.XIII – Área abaixo das curvas ROC A e B. Em média o classificador B é melhor que A, porém em alguns pontos A tem melhor performance que B [12]

O valor de PoD, ou seja, a probabilidade de verdadeiro positivo (VP) é:

$$\text{PoD} = P(\text{VP}) = \frac{\text{VP}}{\text{VP} + \text{FN}} \quad \text{Equação 3.3 [12]}$$

O cálculo da PoD através da equação 3.5 é conhecido como sensibilidade da técnica.

O valor de PFA, ou seja, a probabilidade de falso positivo (FP) é:

$$\text{PFA} = P(\text{FP}) = \frac{\text{FP}}{\text{VN} + \text{FP}} \quad \text{Equação 3.4 [12]}$$

A partir da figura 3.XIV, podemos compreender melhor essa metodologia utilizada. O cordão de solda é dividido em N espaçamentos do mesmo tamanho que

serão inspecionados pela técnica de ultrassom manual, ponto a ponto, obtendo assim as frações VP, VN, FP e FN que serão necessárias para os cálculos de PoD e PFA. A linha verde na figura representa a localização real da descontinuidade enquanto a linha vermelha representa o sinal de detecção obtido na inspeção. Para cada espaçamento, é possível determinar qual dos sinais será utilizado. Para achar a fração referente a cada sinal, devemos aplicar a razão de quadrantes de cada caso pelo número total de quadrantes N [11].

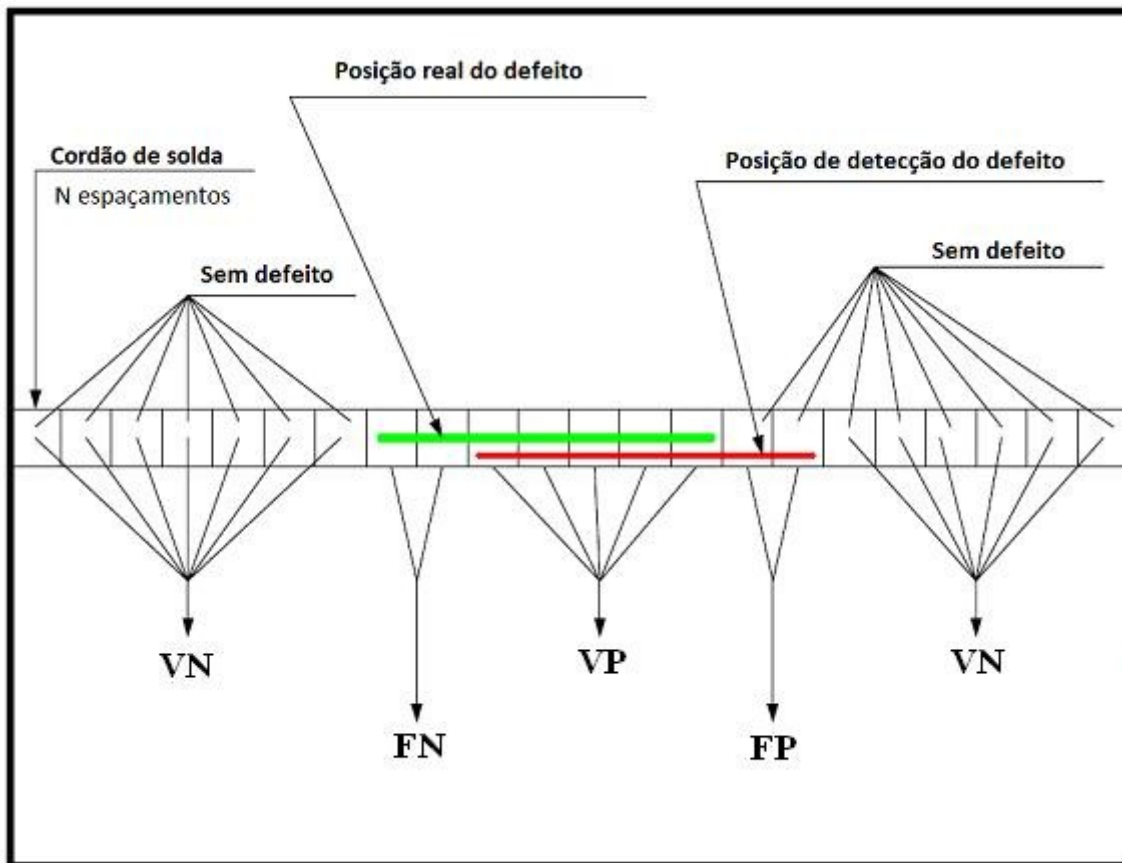
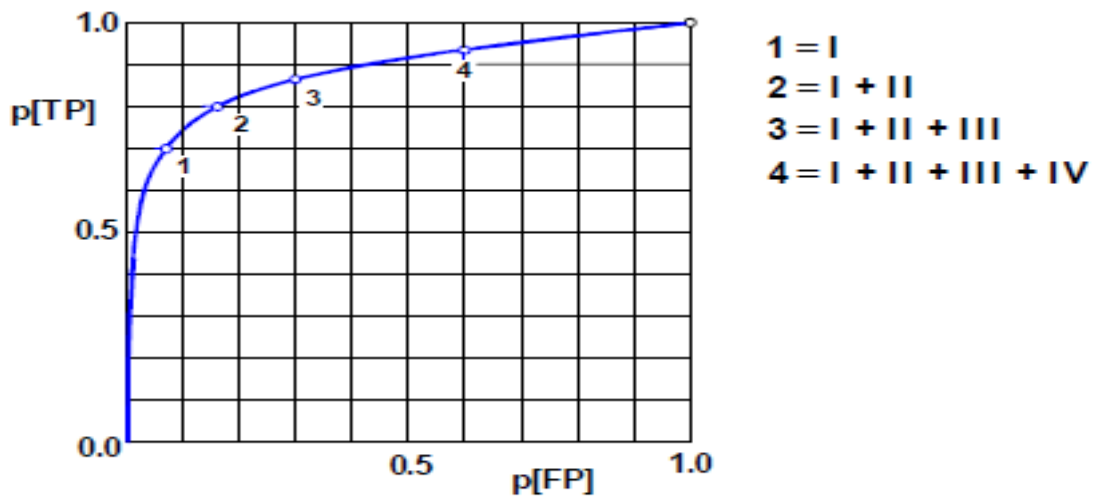


Figura 3.XIV – Exemplo de obtenção das frações [11]

A sensibilidade da técnica aumenta 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, desta forma captando sinais de mais baixa amplitude. Logo, sinais de ruídos podem ser confundidos com sinais oriundos de descontinuidades.

A figura 3.XV ilustra a variação de sensibilidade na curva ROC.



DETECTABILIDADE:

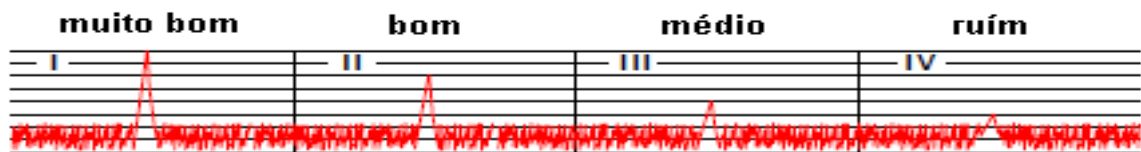


Figura XV – Sensibilidade da curva ROC [11]

Com toda a teoria revisada temos o conhecimento necessário para o desenvolvimento experimental dos ensaios e para a utilização da metodologia que será aplicada na avaliação de sensibilidade através da técnica de ultrassom.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E METODOLOGIA

4.1 – Materiais

4.1.1 – Corpo de Prova

O corpo de prova utilizado na dissertação de mestrado do engenheiro Pablo Uchôa Bartholo com o objetivo de avaliar a probabilidade de detecção aplicado a significância de descontinuidades pela técnica ultrassônica.

A fabricação dos corpos de prova foi feita com a utilização de tubos de especificação API X70, comprimento de 6000mm, espessura de parede de 19,05mm e com diâmetro de 10 polegadas. No duto, foram confeccionadas 14 soldas circunferências com defeitos inseridos artificialmente no momento da deposição dos cordões de solda.

Dentre os defeitos inseridos, podemos citar: falta de fusão, falta de penetração e mordedura. Os defeitos estão ao longo do cordão de solda a uma distância de 45°. Cada cordão de solda possui 8 defeitos, como ilustrado na figura 4.I.

Para o estudo deste trabalho, foram considerados dois tipos de defeitos: falta de fusão e falta de penetração. O defeito do tipo mordedura ficou fora da avaliação, logo os cordões 5,6,12 e 13 não serão estudados nesse trabalho.

Os cordões de solda 10 e 11 foram cortados e utilizados para outros tipos de ensaios, portanto não serão avaliados nesse estudo.

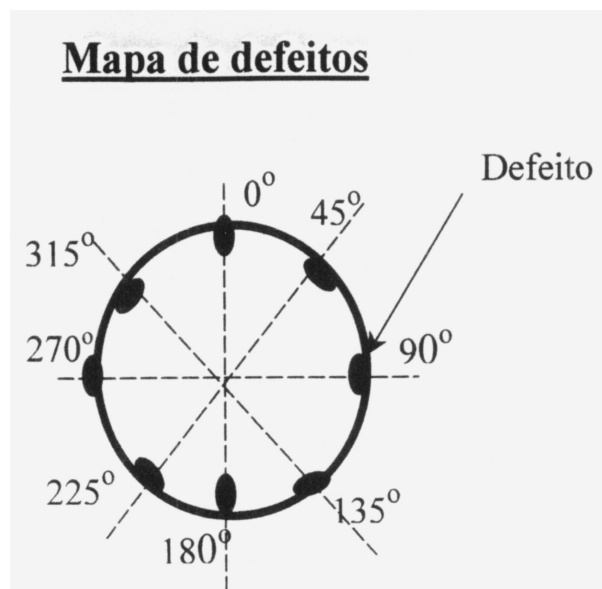


Figura 4.I – Localização dos defeitos inseridos artificialmente

Além disso, dois cordões de solda foram produzidos sem a presença de descontinuidades a fim de diferenciar um defeito de um sinal de ruído. A tabela IV.1 apresenta a disposição dos tipos de defeitos ao longo das soldas. Os cordões de solda coloridos foram utilizados no estudo.

Tabela IV.1 – Relação das soldas com os tipos de defeitos

Solda	Tipo de defeito	Altura do defeito (mm)
1	FP	1 e 2
2	FP	4 e 8
3	FF	1 e 2
4	FF	4 e 8
5	M	1 e 2
6	M	4 e 8
7	sem defeito	x
8	FP	1 e 2
9	FP	4 e 8
10	FF	1 e 2
11	FF	4 e 8
12	M	1 e 2
13	M	4 e 8
14	sem defeito	x

A figura 4.II apresenta o corpo de prova utilizado no estudo com os defeitos inseridos.

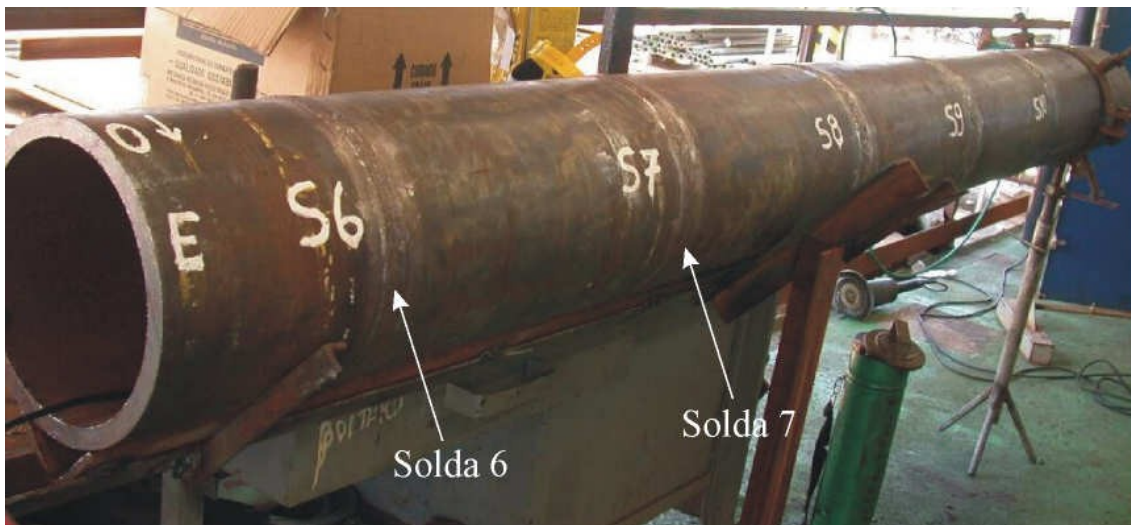


Figura 4.II – Corpo de prova finalizado

4.1.2 – Defeitos

Neste estudo, foram utilizados a falta de penetração e a falta de fusão como tipos de defeitos. O comprimento dessas discontinuidades foi projetado para ser de 20mm,

porém com o processo de inserção de defeitos utilizado nos cordões de solda adotado não é possível afirmar que o comprimento real dos defeitos seja igual ao projetado.

A figura 4.III apresenta a metodologia utilizada para inserir defeitos no cordão de solda. No caso, 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.

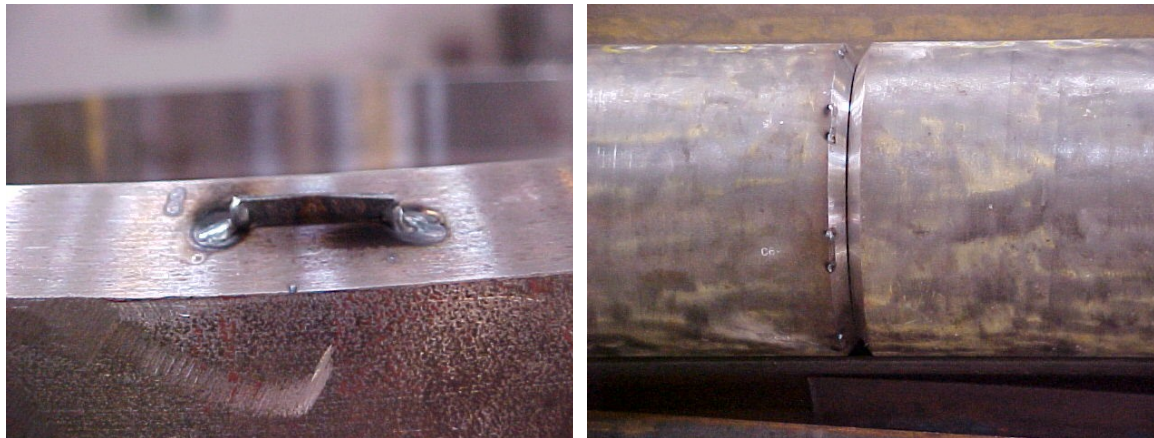


Figura 4.III - Metodologia empregada para simular defeitos do tipo falta de fusão

4.2 – Metodologia

4.2.1 – Planejamento Experimental

Antes de iniciar a coleta de dados através da inspeção ultrassônica manual comum e ponto a ponto para estudo em pesquisa, existe a necessidade de se conhecer a localização e dimensão dos defeitos, ou seja, obtenção de um gabarito. Este gabarito foi elaborado através de resultados experimentais de técnicas auxiliares.

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

Após os ensaios auxiliares, a técnica ultrassônica manual foi aplicada para avaliação da detecção e dimensionamento dos defeitos e posteriormente uma avaliação da sensibilidade da técnica aplicada.

Após obter os resultados experimentais, foi realizado um estudo de confiabilidade através de curvas ROC das inspeções manuais e por fim uma comparação entre as curvas ROC das técnicas ultrassônica manual e automatizada AUT.

4.2.2 – Ensaio Ultrassônico Automatizado (AUT)

Para a inspeção automatizada dos cordões de solda em dutos, foi desenvolvido no LABOEND, laboratório de não destrutivos da UFRJ, como parte de um projeto de ultrassom para verificação de defeitos em soldas circunferências, um veículo que possui rodas magnéticas, permitindo sua fixação e deslocamento por todo o diâmetro do duto. Acoplado ao veículo, temos um conjunto de sensores que são responsáveis pela emissão e recepção dos sinais do ensaio ultrassônico.



Figura 4.IV - Veículo de inspeção de ultrassom automatizado

Para permitir a varredura ultrassônica dos cordões de solda foi utilizado um software responsável pelo controle de movimento do veículo de inspeção e aquisição dos sinais ultrassônicos. O programa utiliza linguagem de programação LABVIEW e permite entre outras funções maior facilidade em sua operação.

Posteriormente os dados da inspeção automatizada serão trabalhados para a elaboração de curvas ROC para cada cordão de solda a fim de comparar com os dados da inspeção manual.

4.2.3 – Ensaio ToFD

No ensaio ToFD foi utilizado um par de transdutores piezo-compósito, tipo normal de onda longitudinal, com frequência central de 5MHz. Também foi utilizado um par de sapatas para ondas longitudinais com ângulo de incidência de 60°. Os transdutores foram posicionados no cordão de solda de modo a proporcionar uma varredura completa da espessura da solda através de uma única inspeção ao longo do perímetro do duto.

O sistema automatizado permite a inspeção dos corpos de prova através da técnica ToFD.

Para a análise dos resultados foi utilizado um programa específico para a leitura dos sinais A-scans e montagem de uma imagem D-scan.

4.2.4 – Ensaio Radiográfico

A inspeção radiográfica foi realizada com raios-X e raios gama, utilizando fonte de cobalto 60. Foi realizada uma primeira avaliação dos defeitos utilizando gamagrafia e geometria de inspeção vista simples parede dupla que resultou na detecção dos defeitos falta de penetração pelo filme radiográfico. Entretanto, os defeitos de falta de fusão não foram detectados por inspeções por gamagrafia nem por raios-X. Desta maneira, novas radiografias, com uma incidência diferente ao plano normal da solda, foram realizadas na tentativa de detectar a falta de fusão localizado na parede do chanfro.

As imagens radiográficas foram processadas com aplicação de filtros digitais específicos, minimizando e até eliminando problemas eventuais na radiografia, permitindo uma melhor visualização dos defeitos presentes no filme radiográfico, facilitando sua identificação e dimensionamento. Esse procedimento foi realizado no antigo LABOEND, laboratório de ensaios não destrutivos da UFRJ, com objetivo de desenvolver outros estudos.

4.2.5 – Ensaio Ultrassônico Manual

O ensaio ultrassônico manual é de suma importância no trabalho em discussão pois iremos avaliar a confiabilidade desta técnica.

A inspeção ultrassônica foi realizada com equipamento EPOCH IV, de fabricação PANAMETRICS, utilizando um transdutor angular de 60° e frequência de 4MHz. Foram também utilizados transdutores angulares de 45° e 70° porém não apresentaram valores maiores de refletividade quanto o de 60°.

A figura 4.V apresenta o equipamento utilizado.



Figura 4.V – Aparelho de ultrassom utilizado na inspeção manual

O estudo da confiabilidade será dividido em duas partes, primeiramente uma inspeção comum ao longo do cordão de solda para localização e dimensionamento dos defeitos seguida de uma inspeção ponto a ponto para avaliar a sensibilidade da técnica aplicada.

4.2.5.1 – Inspeção convencional

A inspeção comum tem como objetivo localizar e dimensionar os defeitos ao longo do cordão de solda.

O comprimento do defeito foi dimensionado 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 V.

4.2.5.2 – Inspeção ponto a ponto

Com o término da inspeção comum e marcação no corpo de prova da localização e dimensionamento dos defeitos, procedeu à inspeção ponto a ponto. Foram feitas marcações com espaçamentos iguais a 10mm ao longo de todo o perímetro do duto. Desta forma a cada marcação de 10mm obtemos a magnitude do sinal de resposta.

Para o desenvolvimento das curvas ROC é necessário obter as amplitudes dos sinais pontualmente e confrontar com a presença ou não de defeitos, dados obtidos na inspeção comum.

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

- Modo I: acima da curva de 100%
- Modo II: entre a curva de 100% e 50%
- Modo III: entre a curva de 50% e 20%
- Modo IV: abaixo da curva de 20%

4.2.6 – Desenvolvimento das Curvas

4.2.6.1 – Curvas ROC ultrassom manual

Em curvas ROC, como já mencionado, existem quatro possíveis sinais de retorno. Para classificar cada um deles, foi necessário adotar uma metodologia própria para a classificação dos sinais. A seguir apresentamos a metodologia utilizada.

Tabela 4.II – Metodologia aplicada para a classificação dos sinais para a técnica ultrassônica manual.

Modo I		
Acima de 100%	com defeito	TP
Acima de 100%	sem defeito	FP
Abaixo de 100%	com defeito	FN
Abaixo de 100%	sem defeito	TN
Modo II		
Acima de 50%	com defeito	TP
Acima de 50%	sem defeito	FP
Abaixo de 50%	com defeito	FN
Abaixo de 50%	sem defeito	TN

Modo III		
Acima de 20%	com defeito	TP
Acima de 20%	sem defeito	FP
Abaixo de 20%	com defeito	FN
Abaixo de 20%	sem defeito	TN
Modo IV		
Abaixo de 20%	com defeito	TP
Abaixo de 20%	sem defeito	FP

A figura a seguir apresenta cada módulo citado na tabela 4.2, associado à curva DAC.

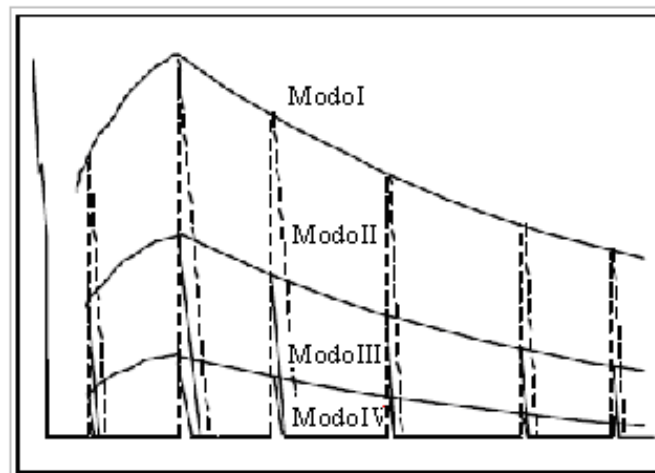


Figura 4.VI – Representação da curva DAC para a metodologia aplicada nas curvas ROC

A tabela 4.II está diretamente associada a figura 4.VI pois para cada limiar de corte, existem 4 sinais diferentes possíveis como resultado. Para o caso do sinal exceder o limiar denominamos de positivo, ou seja, houve a detecção e para o caso de não exceder o limiar denominamos de negativo, ou seja, não houve detecção. Em seguida os dados são confrontados com a presença ou não do defeito. Para o caso de detecção com a presença de defeito, denominamos verdadeiro positivo. Caso contrário, se não houve a presença do defeito, denominamos como um falso positivo.

Para desenvolver a curva ROC, foram necessários cinco pontos.

A metodologia adotada para a determinação dos demais pontos exceto a origem é função direta da sensibilidade da técnica. Abaixo, a metodologia é descrita:

- 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

4.2.6.2 – Curvas ROC ultrassom automatizado AUT

Com o resultado da inspeção auxiliar por ultra-som automatizado para a obtenção do gabarito, foi possível criar as curvas ROC para cada cordão de solda inspecionado. A metodologia adotada foi a mesma utilizada para o ultra-som manual, onde todo o perímetro do duto foi dividido em espaçamentos de 10mm cada. Porém o critério de aceitação utilizado foram sinais de reposta na escala de milivolts (mV) que servem como limiares para análise de sensibilidade da técnica.

Tabela 4.III – Metodologia aplicada para a classificação dos sinais da técnica AUT.

Modo I		
Acima de 2.0mV	com defeito	TP
Acima de 2.0mV	sem defeito	FP
Abaixo de 2.0mV	com defeito	FN
Abaixo de 2.0mV	sem defeito	TN
Modo II		
Acima de 1.5mV	com defeito	TP
Acima de 1.5mV	sem defeito	FP
Abaixo de 1.5mV	com defeito	FN
Abaixo de 1.5mV	sem defeito	TN
Modo III		
Acima de 1.0mV	com defeito	TP
Acima de 1.0mV	sem defeito	FP
Abaixo de 1.0mV	com defeito	FN
Abaixo de 1.0mV	sem defeito	TN
Modo IV		
Abaixo de 0.5mV	com defeito	TP
Abaixo de 0.5mV	sem defeito	FP

A figura 4.VII apresenta cada módulo citado na tabela 4.III.

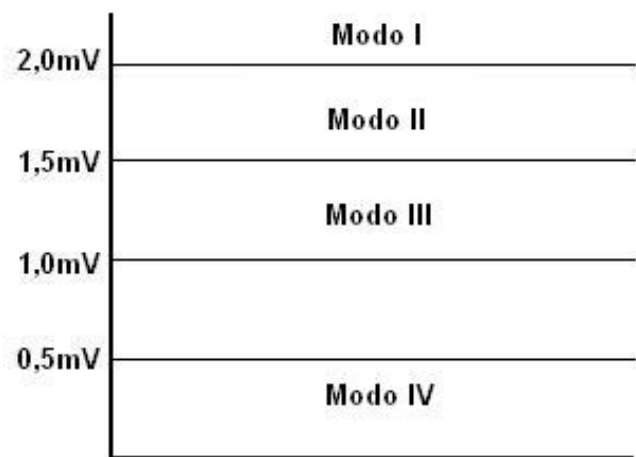


Figura 4.VII – Representação da metodologia aplicada nas curvas ROC

A curva pode ser construída através de cinco pontos, a origem e mais quatro que estão relacionados com os sinais de resposta representados na tabela 4.III.

- 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

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – Resultados de Ensaio Auxiliares

Nos resultados referentes aos ensaios auxiliares podemos destacar que através do ensaio ultrassônico automatizado foi possível obter os dados de comprimento dos defeitos em cada cordão de solda. Já para o ensaio ToFD foi possível obter os dados da altura dos defeitos. Esses dados comparados aos dados de projeto tiveram um valor muito próximo, logo se usou no gabarito o valor da altura projetada.

Para os casos em que não foi possível obter o comprimento através do ensaio ultrassônico automatizado e a altura pelo ensaio ToFD, utilizou-se outra técnica, das 3 auxiliares, que detectou e dimensionou o defeito. Radiografia não é um método adequado para dimensionamento da altura.

A seguir a tabela referente aos valores das inspeções auxiliares.

Tabela 5.I – Gabarito baseado no ensaio ultrassônico automatizado com medidas de comprimento e altura em (mm)

Gabarito AUT - (ToFD + RX)																
	Defeito 1		Defeito 2		Defeito 3		Defeito 4		Defeito 5		Defeito 6		Defeito 7		Defeito 8	
	compr	alt.	compr	alt.	compr	alt.	compr	alt.	compr	alt.	compr	alt.	compr	alt.	compr	alt.
solda 1	45	1	35	1	77	1	47	1	52	2	42	2	51	2	28	2
solda 2	45	4	51	4	43	4	50	4	60	8	51	8	55	8	42	8
solda 3	13	1	16	1	33	1	24	2	17	2	31	2	25	2	20	1
solda 4	34	4	36	4	38	4	31	4	36	8	35	8	34	8	43	8
solda 8	25	1	49	1	34	1	41	2	45	2	37	2	41	2	67	1
solda 9	60	4	77	4	48	4	41	8	62	8	77	8	51	8	80	4

5.2 – Ensaio Ultrassônico Manual

5.3.1 – Inspeção Comum

Os resultados de inspeção do ensaio ultrassônico manual comum são apresentados na tabela 5.II. É apresentada a relação dos cordões de solda com seus respectivos defeitos e seus comprimentos medidos em milímetros.

As lacunas que estão com a marcação de um x, significam a não identificação do defeito por parte do autor do trabalho.

Tabela 5.II – Dados do Ultrassom manual comum relacionando o defeito e seu comprimento em mm.

	Defeito 1	Defeito 2	Defeito 3	Defeito 4	Defeito 5	Defeito 6	Defeito 7	Defeito 8
	compr	compr	compr	compr	compr	compr	compr	compr
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

Como mencionado anteriormente na seção 4.1.1, os cordões de solda 10 e 11 foram retirados do duto com objetivo de realizar outros ensaios com esse corpo de prova. Desta maneira os resultados da inspeção feita pelo autor do trabalho serão apresentados os comprimentos dos defeitos para a os cordões de solda 10 e 11.

5.3.2 – Inspeção Ponto a Ponto

Os resultados da inspeção ultrassônica manual ponto a ponto para cada cordão de solda são apresentados a seguir na tabela 5.III. Com os resultados de amplitude de

sinais e presença ou não de defeitos é possível o cálculo de PoD e PFA e conseqüentemente o desenvolvimento das curvas ROC.

Tabela 5.III – Dados da inspeção ponto a ponto já calculados para os valores de PoD e PFA.

	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Solda 1				
PoD	1	1	0.7	0.67
PFA	1	1	0.2	0.06
Solda 2				
PoD	1	1	0.91	0.91
PFA	1	1	0.32	0.17
Solda 3				
PoD	1	1	1	1
PFA	1	1	0.33	0.18
Solda 4				
PoD	1	1	0.96	0.85
PFA	1	1	0.26	0.16
Solda 8				
PoD	1	1	0.84	0.82
PFA	1	1	0.34	0.19
Solda 9				
PoD	1	1	0.84	0.82
PFA	1	1	0.34	0.19

5.4 – Curvas ROC

Avaliando pontualmente o cordão de solda, obtemos as amplitudes dos sinais para cada 10 milímetros e confrontamos com a presença ou não do defeito.

Os resultados dos cálculos de PoD e PFA já foram apresentados na seção anterior. Desta forma, o gráfico 5.I apresenta as curvas ROC de todos os cordões de solda avaliados pela técnica de ultrassom manual.

Lembrando que os cordões de solda 5, 6, 12 e 13 que possuem defeitos do tipo mordedura, e os cordões de solda 10 e 11 que foram cortados não entraram na avaliação deste trabalho.

Foram também avaliados os resultados do ultrassom automatizado, sendo assim, apresentaremos também a curvas ROC para a técnica AUT.

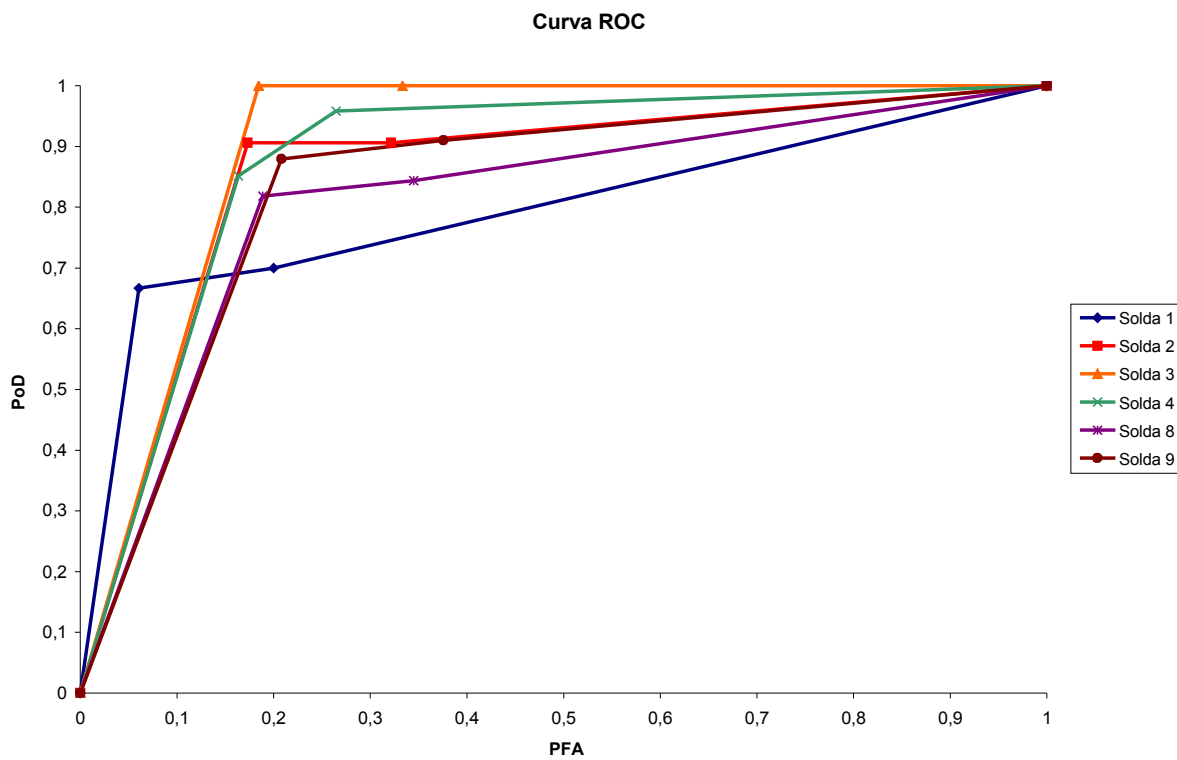


Figura 5.I – Curvas ROC com todos os cordões de solda estudados no ultrassom manual

A partir dos dados de PoD, PFA, dos diferentes tipos de altura, dos diferentes tipos de defeitos e da amplitude, algumas conclusões podem ser feitas.

Um forma de análise é relacionar as curvas ROC em função de diferentes alturas. A figura 5.II, apresenta essa relação.

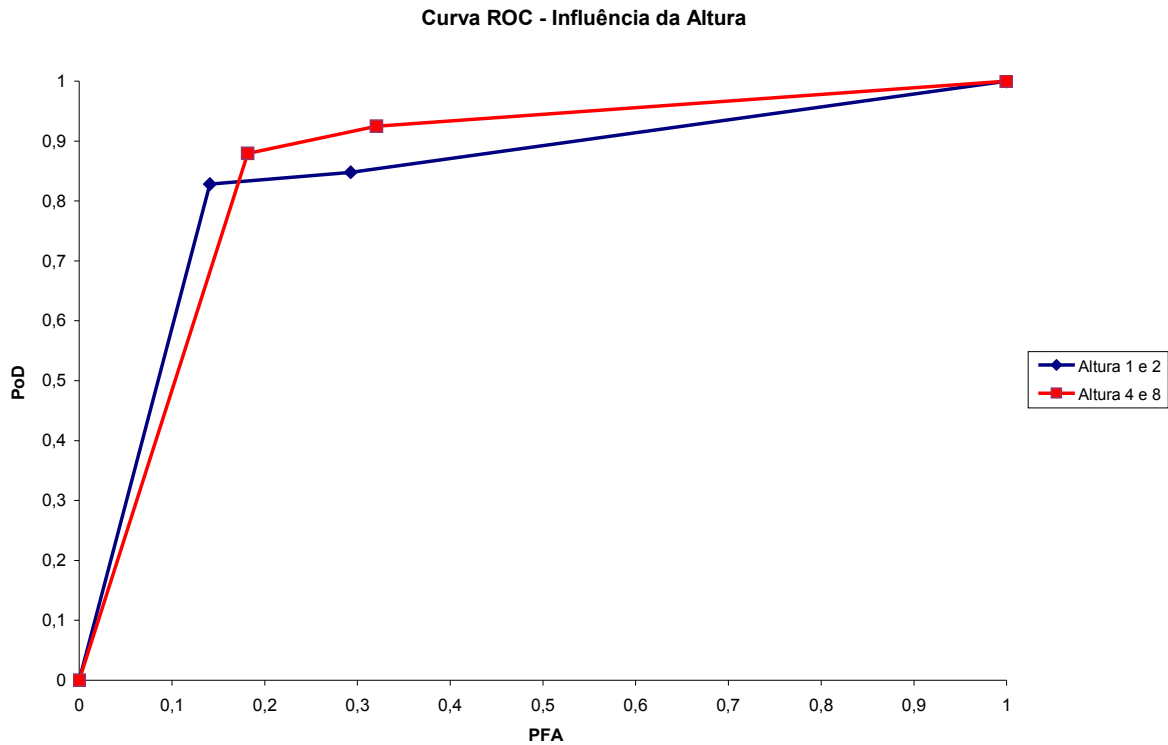


Figura 5.II – Influência da altura em curvas ROC

Quando analisamos as curvas de diferentes alturas com o valor de PoD, percebemos que para um valor de altura maior (4 e 8 mm), o valor de PoD é também mais elevado, ratificando que quanto maior o tamanho do defeito maior sua probabilidade de detecção devido a maior refletividade as ondas. Quando analisamos as alturas com o valor de PFA, os resultados nos mostram que para pontos equivalentes, com mesma amplitude de sinais, os valores de PFA são menores para alturas menores (1 e 2 mm). Porém, existe uma incoerência, por serem defeitos com valores de alturas inferiores, esses valores de PFA deveriam ser maiores devido a possibilidade de se considerar um sinal de ruído perante um defeito de pequena medida por parte do inspetor.

A seguir, o gráfico apresenta as probabilidades variando com a amplitude a fim de corroborar as conclusões feitas através do gráfico 5.II

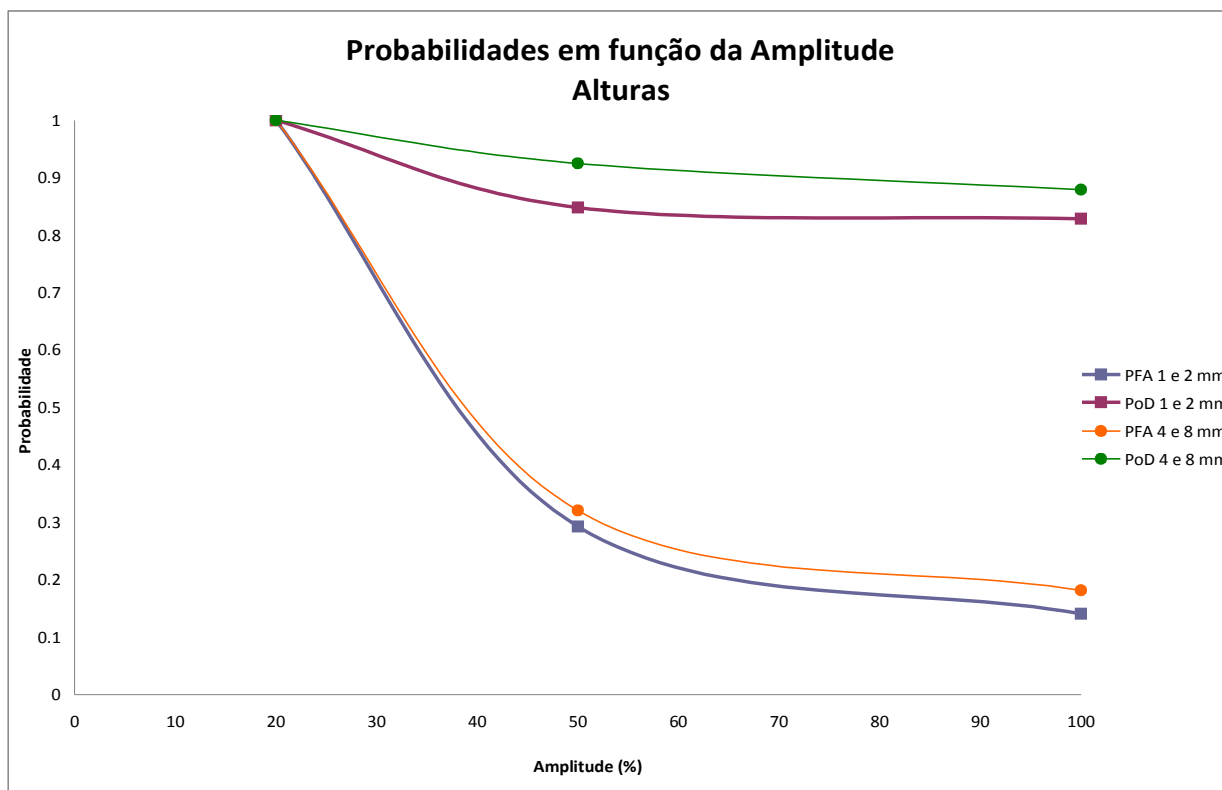


Figura 5.III – Probabilidades em função da Amplitude para alturas 1 e 2 e 4 e 8 mm.

A figura 5.III apresenta a relação das probabilidades em função da amplitude para as diferentes alturas facilitando a visualização e a explicação da figura 5.II. É notável a maior probabilidade de detecção para alturas 4 e 8 milímetros e a menor influência dos falsos alarmes nos defeitos de altura 1 e 2 milímetros, o que não era esperado.

Quando analisamos a amplitude do sinal, para valores superiores a 50% de amplitude os valores de PoD se mantêm próximos a 90% e os valores de PFA tendem a diminuir mantendo uma faixa de 20%. Para valores de amplitude inferiores a 50% temos uma tendência a 100% das probabilidades demonstrando que quanto menor a amplitude, maior a sensibilidade, ou seja, todos os sinais, ruídos e defeitos, são detectados e caracterizados como defeitos.

Uma outra forma de análise é relacionar as curvas ROC em função de diferentes tipos de defeitos. A figura 5.IV apresenta essa relação.

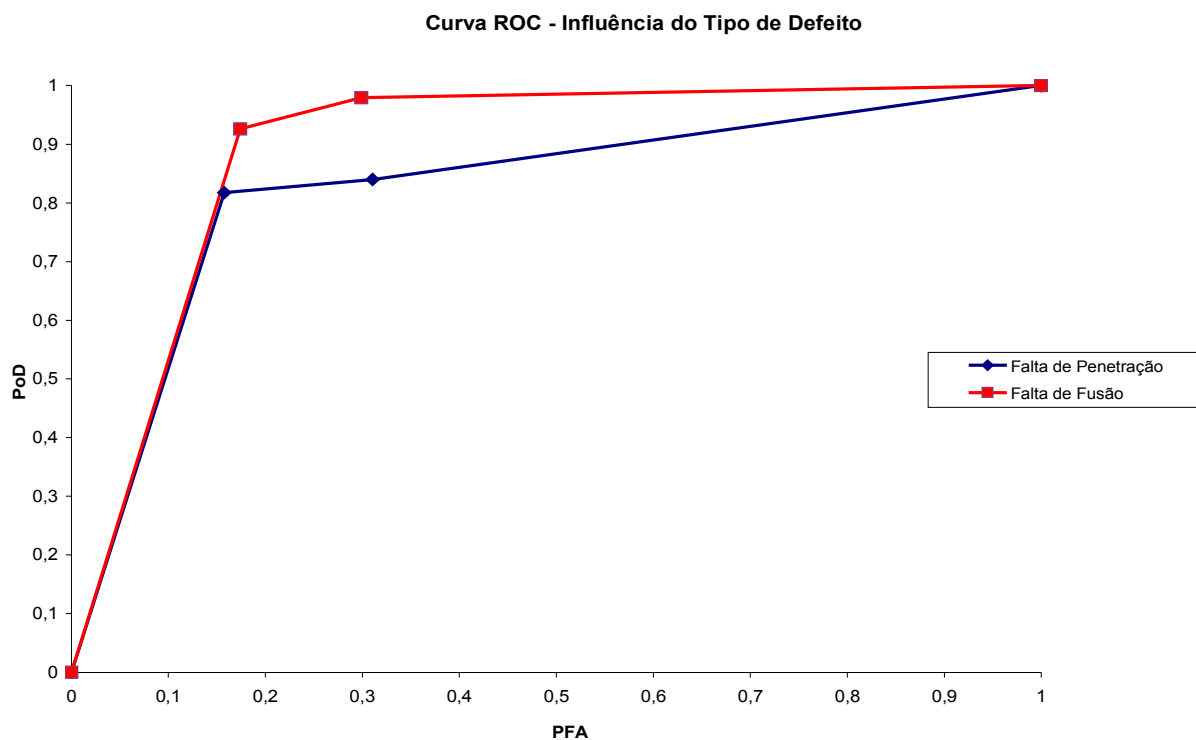


Figura 5.IV – Influência do tipo de defeito em curvas ROC

No gráfico 5.IV, para defeitos do tipo falta de fusão, os valores de PoD são mais elevados em relação aos valores dos defeitos do tipo falta de penetração. Isso pode ser explicado devido o defeito falta de penetração estar localizado na raiz do cordão de solda, sendo em muitos casos confundido com um sinal de raiz. Em alguns casos o inspetor pode recorrer ao percurso sônico e afirmar se é um sinal de defeito ou sinal de raiz. 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.

A seguir, o gráfico 5.V apresenta a relação das probabilidades e amplitude afim de corroborar as conclusões feitas através do gráfico 5.IV.

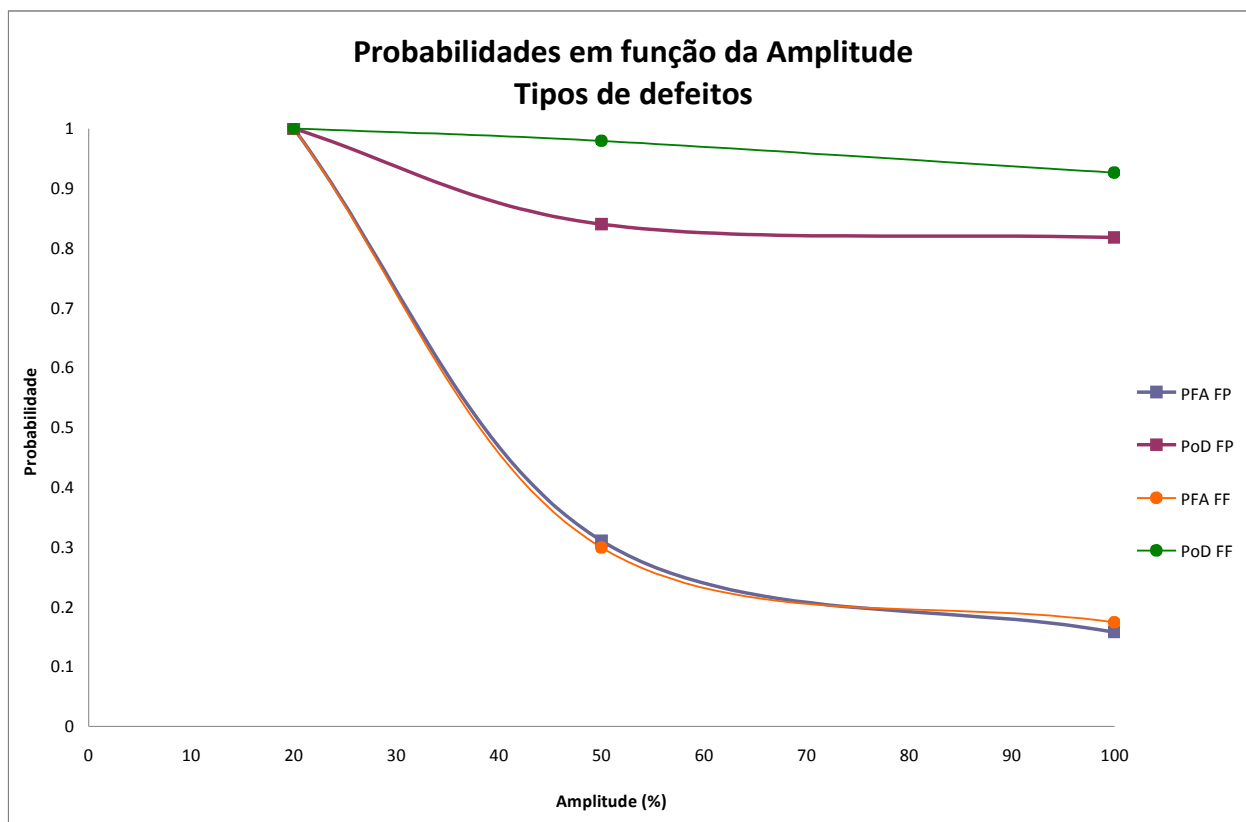


Figura 5.V - Probabilidades em função da Amplitude para diferentes tipos de defeito.

A comparação dos tipos de defeitos na figura 5.V fica evidente a superioridade nos valores de probabilidade de detecção para defeitos de falta de fusão. Analisando as curvas de PFA, notamos que os valores são muito próximos e que em determinada faixa de amplitude, 40% a 50%, o PFA para o defeito falta de fusão é pouco inferior e para valores superiores a 85% de amplitude, este valor se torna pouco superior. A amplitude abaixo de 50%, representa um aumento na sensibilidade tendendo as probabilidades a 1.

Agora analisaremos as curvas ROC dos cordões de solda para o ensaio ultrassônico automatizado. A figura 5.VI apresenta os resultados das curvas ROC para a técnica de ultrassom automatizada. Em relação aos valores da técnica manual, podemos perceber uma sensível melhora nos resultados de confiabilidade.

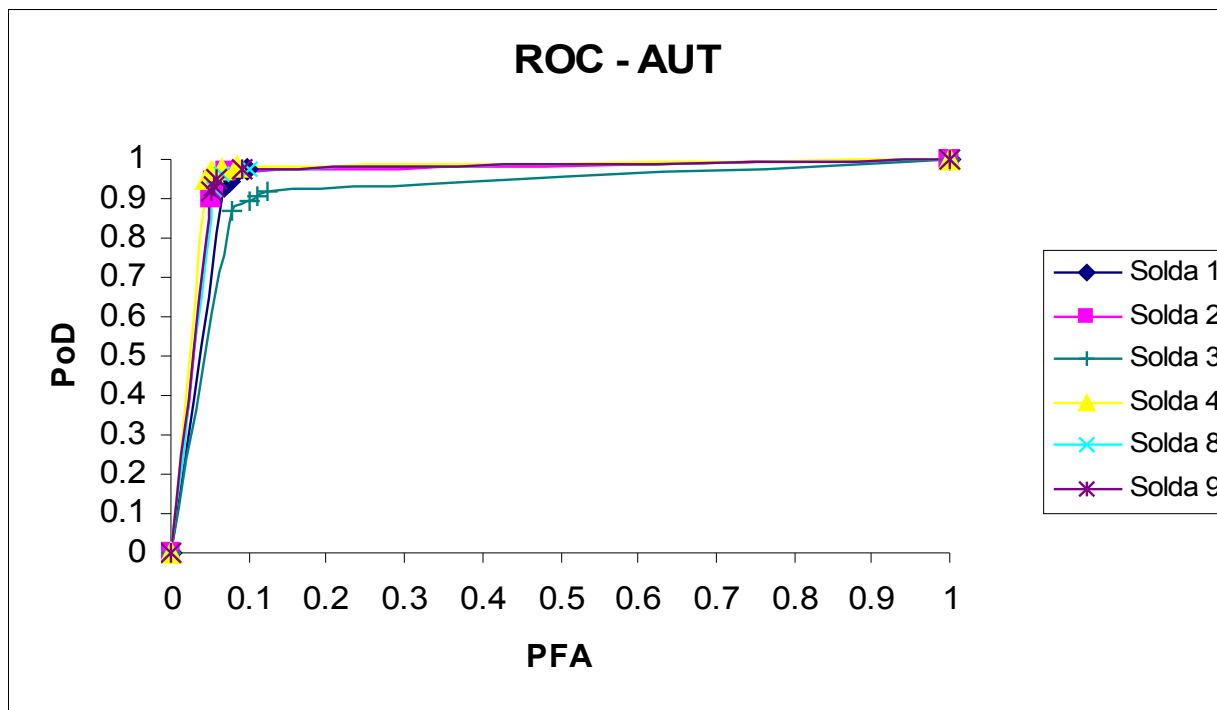


Figura 5.VI - curvas ROC para o ensaio ultrassônico automatizado AUT

Para uma melhor avaliação da confiabilidade através de curvas ROC para a técnica ultrassônica manual e automatizada, serão apresentados os resultados de cada cordão de solda estudado nesse projeto.

Na figura 5.VII observamos para um defeito de falta de penetração a notável diferença entre os resultados para o ensaio ultrassônico manual e automatizado, onde não são levados em consideração a falha humana na inspeção. Os resultados de AUT apresentam resultados de PoD próximos de 95% e valores de PFA menores que 10%.

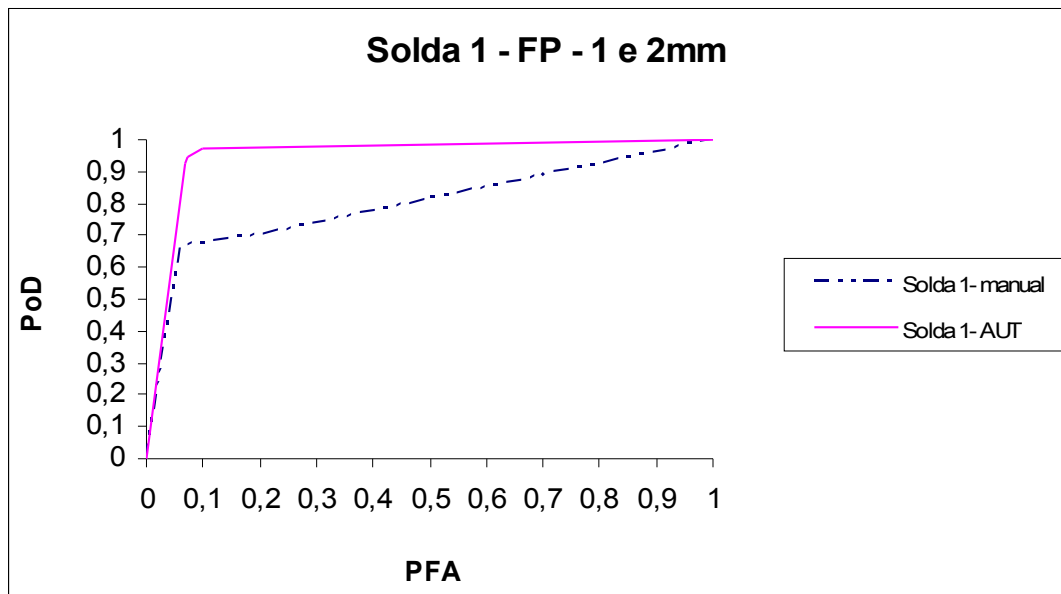


Figura 5.VII - curva ROC para a solda 1 para inspeção manual e automatizada.

Na figura 5.VIII temos uma melhora significativa nos resultados de PoD da inspeção manual e uma pequena variável para os valores de AUT. Mais uma vez demonstrando as incertezas da inspeção manual que têm grande influência de falha humana.

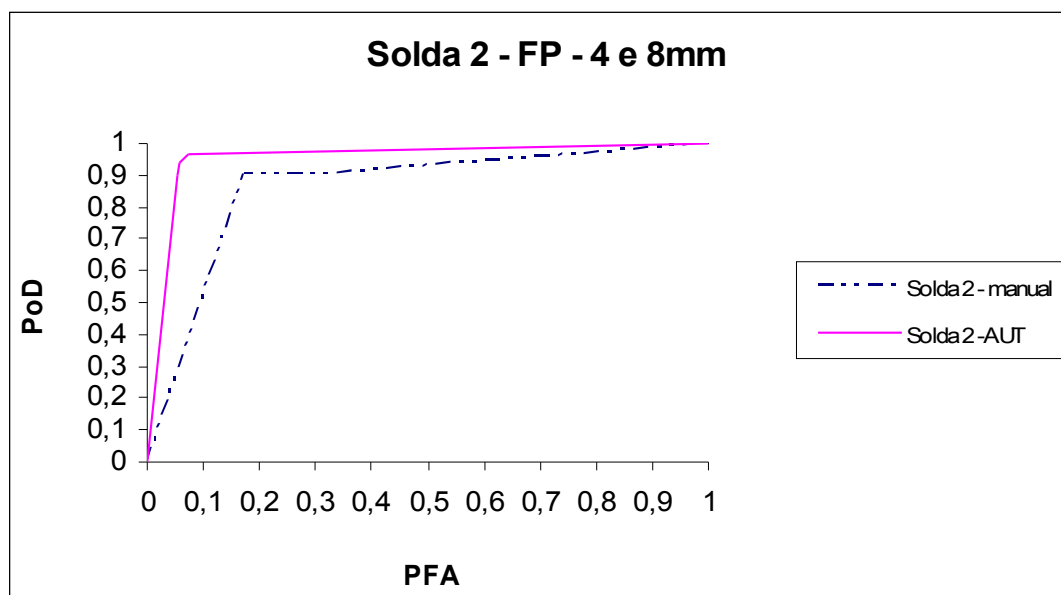


Figura 5.VIII - curva ROC para a solda 2 para inspeção manual e automatizada.

Na figura 5.IX são apresentados os resultados para o cordão de solda 3 que possuem defeitos de falta de fusão. Neste caso percebemos que os valores de PFA são superiores para a técnica manual, porém em certo momento, os valores de PoD da técnica automatizada são inferiores aos da técnica manual. Isto se deve aos resultados do AUT para esse cordão, já que alguns defeitos não foram detectados.

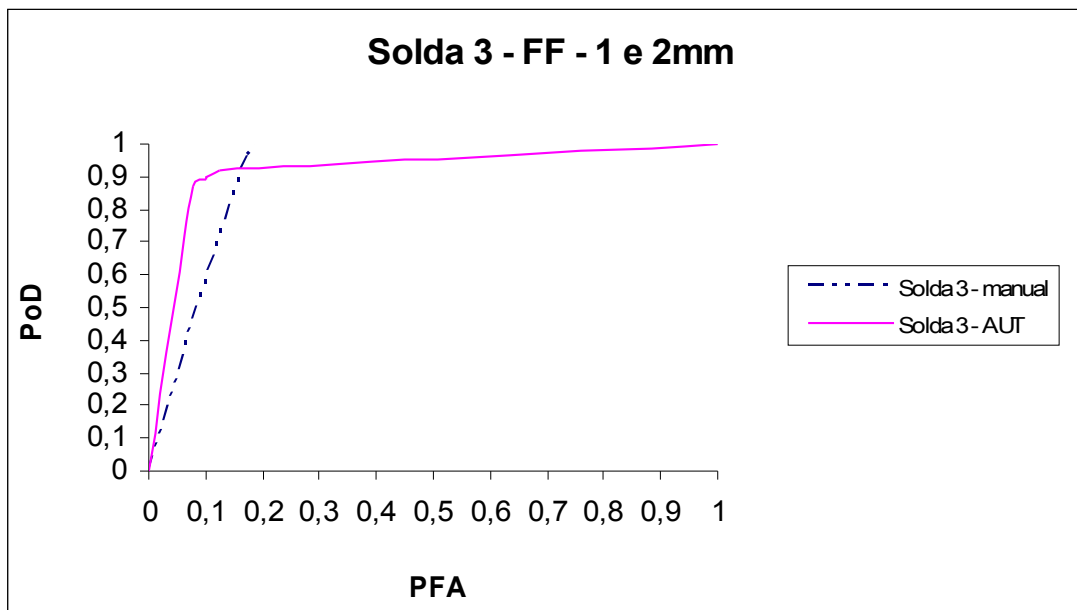


Figura 5.IX - curva ROC para a solda 3 para inspeção manual e automatizada.

Na figura 5.X correspondente a solda 4 para o defeito falta de fusão e apresentam resultados significantes e coerentes para as duas técnicas. Ambos apresentam valores acima de 90% de PoD para um PFA com valores menores de 10% para a automatizada e na faixa de 20% a 30% para a manual.

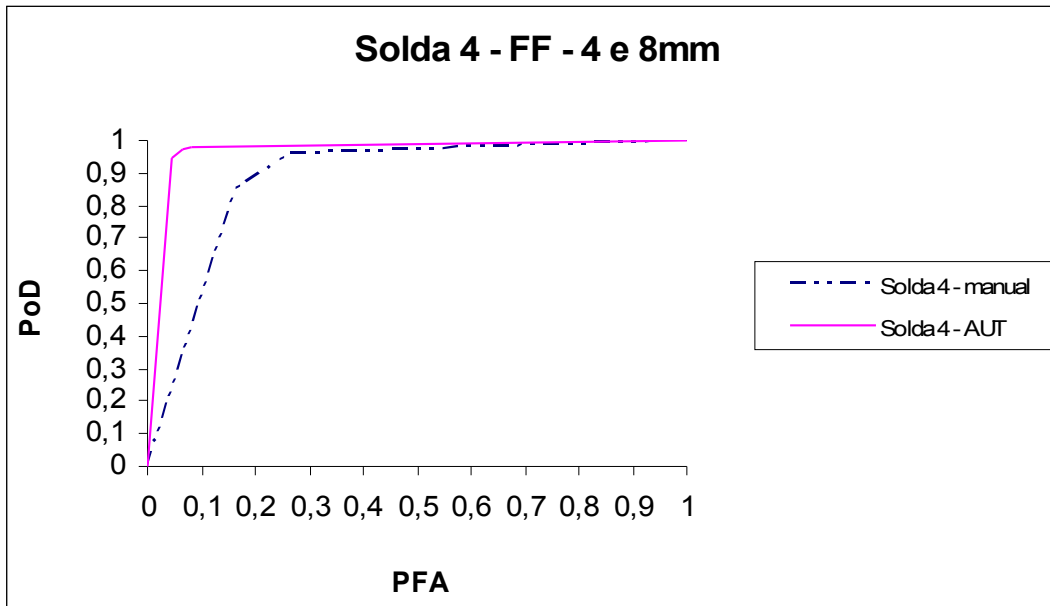


Figura 5.X - curva ROC para a solda 4 para inspeção manual e automatizada.

Na figura 5.XI são apresentados os resultados da solda 8 com defeito do tipo falta de penetração, onde os valores se mantêm próximos de 95% de PoD para valores inferiores a 10% de PFA para a técnica automatizada. No caso da manual os valores se mantêm próximos de 90% de PoD para valores de 20% de PFA.

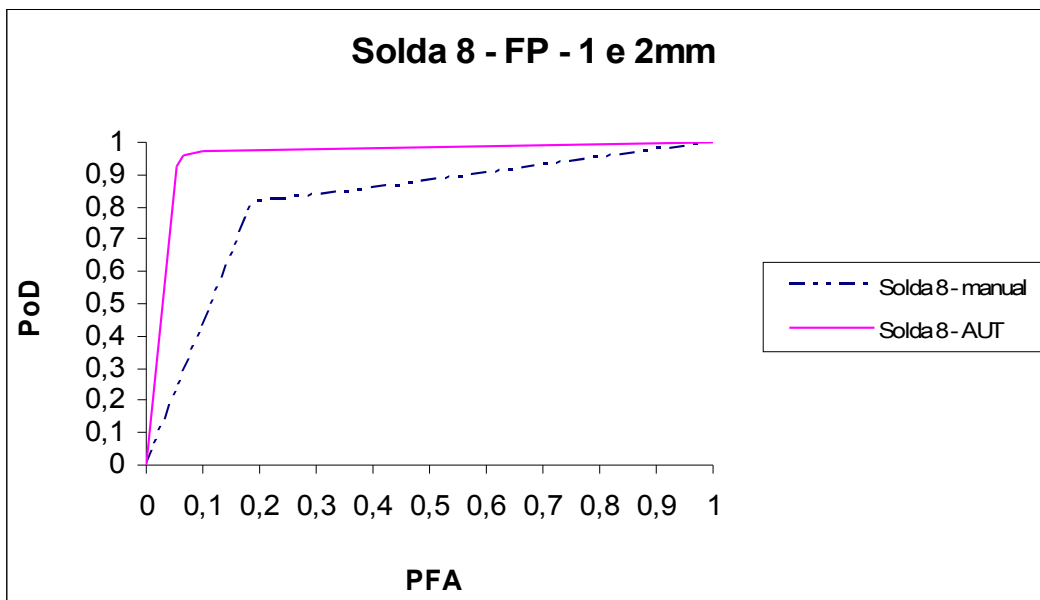


Figura 5.XI - curva ROC para a solda 8 para inspeção manual e automatizada.

Na figura 5.XII, para o mesmo tipo de defeito da figura 5.XI notamos a manutenção dos valores para a técnica ultrassônica, próximos de 95% de PoD para valores abaixo de 10% de PFA. Na técnica manual mantém os padrões de 90% PoD para valores variando de 20% a 30% de PFA.

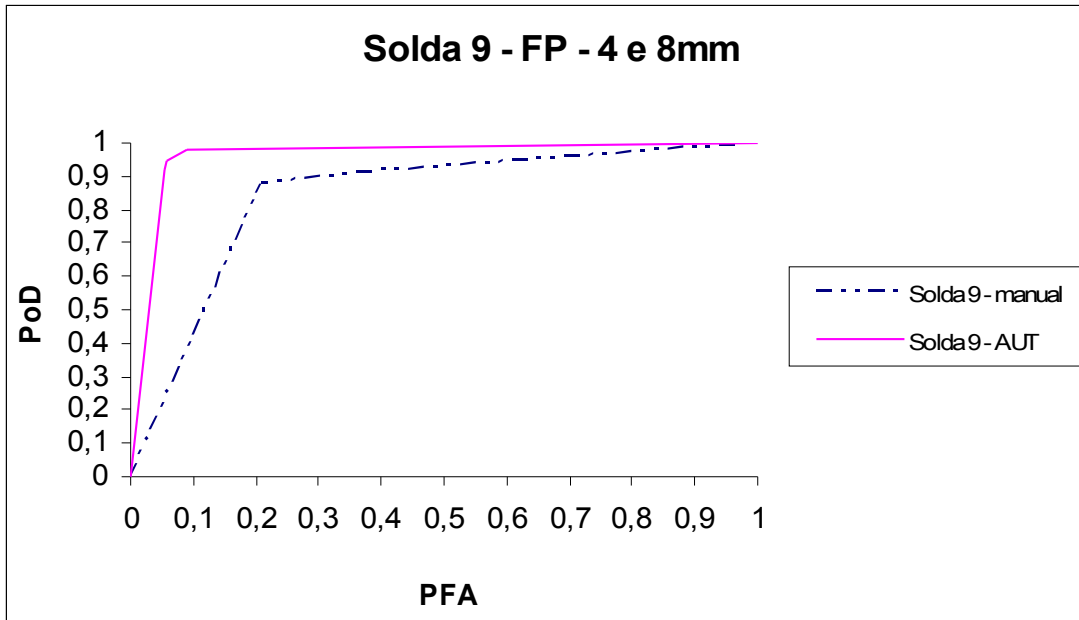


Figura 5.XII - curva ROC para a solda 9 para inspeção manual e automatizada.

Para melhor visualização dos valores apresentados pelas curvas ROC para cada técnica ultrassônica, as tabelas 5.IV e 5.V foram elaboradas.

A tabela 5.IV apresenta os valores de PFA manual e automatizada para um corte de 90% de PoD.

Tabela 5.IV – Valores de PFA para um corte de 90% de PoD

	PoD	PFA – manual	PFA – AUT
Solda 1	90%	70%	6%
Solda 2	90%	17%	5,2%
Solda 3	90%	18%	10%
Solda 4	90%	20%	4,4%
Solda 8	90%	52%	5,4%
Solda 9	90%	29%	5,3%

A tabela 5.V apresenta os valores de PoD manual e automatizada para um corte de 10% de PFA.

Tabela 5.V – Valores de PoD para um corte de 10% de PFA

	PFA	PoD – manual	PoD – AUT
Solda 1	10%	68%	96%
Solda 2	10%	55%	97%
Solda 3	10%	65%	90%
Solda 4	10%	55%	98%
Solda 8	10%	50%	96%
Solda 9	10%	45%	96%

Os resultados das tabelas 5.IV e 5.V apresentam a significância influência dos fatores humanos nos resultados de inspeção da técnica ultrassônica. Para um corte de 90% de PoD a técnica manual apresentou valores variando entre 20% e 70% de PFA. Já para um corte de 10% de PFA a técnica manual apresentou valores de PoD variando entre 45% e 70% de PoD. Para o caso da técnica automatizada, apresentou valores de PoD acima de 90% para valores de PFA abaixo de 10%.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou a sensibilidade da técnica ultrassônica manual e automatizada através da metodologia das curvas ROC. Para a técnica manual foi estudado a influência de diferentes tipos de defeitos, diferentes alturas e a influência humana na execução das inspeções.

Na avaliação de sensibilidade para a influência de diferentes alturas, na técnica de ultrassom manual, percebemos que para valores maiores de altura (4 e 8 mm) o valor de PoD também é maior. Quanto a análise dos valores de PFA, para pontos equivalentes, ou seja, para um mesmo limiar para alturas menores (1 e 2 mm) os valores de PFA também são menores, o que pode ser contraditório devido a possibilidade de um defeito menor ser confundido com um sinal de ruído.

Na avaliação de sensibilidade para a influência de diferentes tipos de defeito, os resultados de PoD para os defeitos do tipo falta de penetração apresentaram valores muito inferiores aos valores do tipo falta de fusão. Quanto aos valores de PFA, para um mesmo threshold, possuem valores muito próximos não apresentando diferença significativa.

Quando a análise é comparando as técnicas de ultrassom manual e automatizada, fica evidente a superioridade dos resultados do ensaio automatizado. O AUT apresentou valores de PoD de 95% para valores de PFA menores que 10%. Os resultados para a técnica manual sofrem algumas influências como calibração do equipamento, geometria da peça e processo de fabricação do material, porém o que mais efetivamente influência são os fatores humanos. Desta maneira, os valores de PoD para a técnica manual apresentaram valores entorno de 90% para valores entre 20% e 30% de PFA. Em alguns casos, os valores de PFA ficaram muito acima deste intervalo, como apresentado na tabela 5.IV.

Contudo, podemos concluir que a metodologia para avaliação de sensibilidade através de curvas ROC apresentam excelentes resultados com um baixo custo e em curto espaço de tempo.

sendo mais significativa na técnica manual para a influência do tipo de defeito. A avaliação entre as técnicas manual e automatizadas deixam explícitas os fatores humanos e a evolução dos equipamentos e programas de ensaios automatizados.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] ANDREUCCI, Ricardo, “Ensaio por Ultrassom”, ABENDE, Julho 2003;
- [2] SOARES, Sérgio, “Evolução de sistemas ultrassônicos automáticos no Brasil”, COTEQ, Salvador, Agosto 2002;
- [3] MODENESI, Paulo Jr., “Soldagem e inspeção em juntas de soldadas”, UFMG, novembro 2001;
- [4] GEORGIU, George A., Probability of Detection (POD) Curves – Derivation, Applications and Limitations, Jacob Consulting Limited for the Health and Safety Executive 2006;
- [5] BARTHOLO, Pablo U., “POD aplicado a significância de descontinuidades pela técnica ultrassônica”, dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011;
- [6] MEEKER William Q., “PoD Tutorial Part I – Dealing with Hit/Miss Data”, Center for Nondestructive Evaluation Department of Statistics Iowa state University;
- [7] Ginzel E.A., Matheson M., Feher B, Probability of Rejection, Waterloo, Ontario, Canada, 2009;
- [8] Guidelines for NDE Reability Determination and Description (NT TECHN REPORT 394), Nordtest, Fevereiro, 2003;
- [9] Medronho R.A., Perez M.A., Testes Diagnósticos, Rio de Janeiro: editora Atheneu, 2002
- [10] Braga A.C., Curvas ROC, aspectos funcionais e aplicações, Universidade do Minho, Dezembro 2000;
- [11] Fucsok F., Muller C., Scharmach M., Measuring of the reability of NDE, The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive testing, slovenia 2005;
- [12] Silva, F.C., Analise ROC, São José dos Campos, Dezembro 2006;
- [13] Egan, J. P., Signal Detection Theory and ROC Analysis. Series in Cognition and Perception. Academic, Press, New York, 2005;