

ANÁLISE DE DEFEITOS DE CORROSÃO EM AÇOS COM REVESTIMENTOS ORGÂNICOS UTILIZANDO ULTRASSOM FOCALIZADO E ONDAS SUPERFICIAIS

Otávio De Bodt Santos Rocha

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

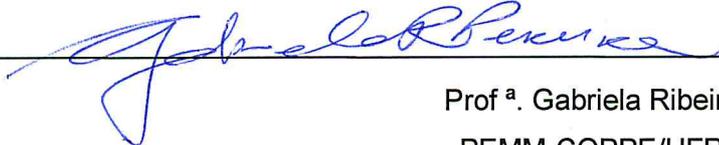
Rio de Janeiro
AGOSTO/2014

ANÁLISE DE DEFEITOS DE CORROSÃO EM AÇOS COM REVESTIMENTOS
ORGÂNICOS UTILIZANDO ULTRASSOM FOCALIZADO E ONDAS SUPERFICIAIS.

Otávio De Bodt Santos Rocha

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA 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 METALÚRGICO.

Examinada por:


Prof^a. Gabriela Ribeiro Pereira, D. Sc.
PEMM-COPPE/UFRJ - (Orientadora)


Prof^a. Isabel Cristina Pereira Margarit-Mattos, D. Sc.
PEMM-COPPE/UFRJ


Maria Cristina López Areiza, D. Sc.
COPPETEC/UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO de 2014

Rocha, Otávio De Bodt Santos

Análise de Defeitos de Corrosão em Aços com Revestimentos Orgânicos Utilizando Ultrassom Focalizado e Ondas Superficiais./ Otávio De Bodt Santos Rocha. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

VIII, 76 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Projeto de graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica, 2014.

Referências Bibliográficas: p.75-76.

1.Ultrassom 2.Revestimentos Orgânicos 3.Ensaio Não Destrutivo. I. Pereira, Gabriela Ribeiro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Metalúrgica. III. Análise de Defeitos de Corrosão em Aços com Revestimentos Orgânicos Utilizando Ultrassom Focalizado e Ondas Superficiais.

Dedico a todos que contribuíram e torceram para que eu chegasse até aqui...

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por ter me dado forças para quebrar as barreiras da vida, podendo assim concluir mais uma etapa em minha vida.

Aos meus pais, Ruy e Cláudia, por todo apoio e incentivo, não medindo esforços para que eu alcance todos os meus sonhos.

A minha namorada Camille, por toda atenção, apoio, amor e carinho nas horas de angústia, e família, pelo mesmo apoio e confiança.

A professora Gabriela Ribeiro Pereira pela oportunidade de realizar este projeto, paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão do mesmo.

A equipe de END do LNDC, em especial a engenheira Priscila Almeida pela dedicação e paciência a qualquer momento desde a época de bolsista de iniciação científica até o momento de preparação e conclusão de projeto.

A todos os professores da Escola Politécnica, em especial aos da MetalMat que contribuíram de maneira decisiva para minha formação acadêmica e como pessoa.

Aos meus amigos, cujos sucessos e fracassos dividimos juntos.

Ao CENPES, em especial, ao engenheiro Sérgio Damasceno Soares por disponibilizar o material para que eu pudesse utilizar no presente trabalho.

E a todas as outras pessoas que de alguma forma ajudaram direta ou indiretamente para que eu chegasse até aqui.

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

ANÁLISE DE DEFEITOS DE CORROSÃO EM AÇOS COM REVESTIMENTOS ORGÂNICOS UTILIZANDO ULTRASSOM FOCALIZADO E ONDAS SUPERFICIAIS.

Otávio De Bodt Santos Rocha

Agosto/2014

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Curso: Engenharia Metalúrgica

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho das técnicas de ultrassom focalizado e ultrassom por ondas superficiais na detecção de defeitos localizados abaixo de revestimentos orgânicos anticorrosivos utilizados na indústria de petróleo. Imagens C-scan foram obtidas pelo método pulso-eco com imersão em água no caso do ultrassom focalizado, detectando e dimensionando os defeitos controlados. No caso do ultrassom por ondas superficiais, somente alguns defeitos foram detectados. Essa última técnica foi prejudicada pela criação de defeitos não planejados durante a fabricação dos corpos de prova, cuja detecção foi confirmada pelo ultrassom focalizado. O ultrassom focalizado obteve os melhores resultados com erros globais aceitáveis no dimensionamento dos defeitos explorados, apresentando-se como uma técnica promissora na detecção dos mesmos.

Palavras-chave: Revestimentos Orgânicos, Ensaios Não Destrutivos, Ultrassom Focalizado, Ondas Superficiais.

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

EVALUATION OF CORROSION FAILURES IN STEEL WITH ORGANIC COATINGS BY FOCUSED ULTRASOUND AND SURFACE WAVES

Otávio De Bodt Santos Rocha

August/2014

Advisor: Gabriela Ribeiro Pereira

Course: Metallurgical Engineer

This study aims to evaluate the performance of focused ultrasound and ultrasound by surface waves techniques on the detection of defects located below anticorrosive organic coatings for the oil industry. C-scan images were obtained by the pulse-echo method with immersion in water with focused ultrasound, detecting and sizing controlled defects. In the case of ultrasound by surface waves, only a few defects were detected. This last technique was impaired by unplanned defects created during fabrication of the test pieces, whose detection was confirmed by focused ultrasound. The focused ultrasound gave the best overall results with acceptable errors in the dimensioning of the defects, making it a promising technique in their detection.

Keywords: Organic Coatings, Nondestructive Testing, Focused Ultrasound, Surface Waves.

Sumário

Agradecimentos	4
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Ensaio por Ultrassom.....	3
2.1.1. Tipos de Ondas	4
2.1.2. Efeito Piezoelétrico	11
2.1.3. Tipos de Transdutores	12
2.1.4. Fatores que Afetam a Inspeção.....	17
2.1.4.1. Impedância Acústica.....	17
2.1.4.2. Campo Próximo ou Zona de Fresnel	18
2.1.4.3. Campo Distante ou Zona de Fraunhofer	20
2.1.4.4. Atenuação Sônica	20
2.1.4.5. Acoplantes.....	21
2.1.5. Métodos de Inspeção	22
2.1.5.1. Método Pulso-Eco	22
2.1.5.2. Método por Transmissão.....	23
2.1.5.3. Método <i>Pitch-Catch</i>	24
2.1.6. Avaliação dos Resultados	25
2.1.7. Cuidados Iniciais com a Inspeção	27
2.1.7.1. Procedimento de Calibração	28
2.1.7.2. Blocos de Referência.....	28
2.1.7.3. Frequência de Inspeção.....	28
2.2. Revestimentos Anticorrosivos	30
2.2.1. Cuidados prévios a aplicação do revestimento.....	32
2.2.2. Revestimentos Não Metálicos Orgânicos	33
2.2.2.1. Constituintes das Tintas	34
2.2.2.2. Propriedades das Tintas e Formação de Película	35
2.2.2.3. Seleção de Esquemas de Pintura	36
2.2.2.4. Falhas em Revestimentos Anticorrosivos	36
2.3. Trabalhos anteriores	38
3. Materiais e Métodos.....	39
3.1. Introdução	39
3.2. Corpos de Prova – Confeção e Características	39

3.2.1. Revestimentos	44
3.3. Aparelhagem	47
3.4. Procedimento Experimental	49
3.4.1. Ultrassom Focalizado	50
3.4.2. Ultrassom por Ondas Superficiais	51
4. Resultados e Discussão	53
4.1. Ultrassom Focalizado	53
4.1.1. Dimensionamento de defeitos	60
4.1.1.1. Corpos de Prova com 6 furos	60
4.1.1.2. Corpos de Prova com 3 furos	64
4.2. Ultrassom por Ondas Superficiais	67
4.2.1. Dimensionamento de defeitos	72
4.3. Comparação entre as técnicas utilizadas	73
5. Conclusão	75
6. Trabalhos Futuros	76
7. Referências	77

1. Introdução

Os ensaios não destrutivos estão cada vez mais sendo utilizados nas indústrias química, petroquímica, aeroespacial, automotiva, dentre outras. A procura por formas de aperfeiçoar as paradas para manutenção é cada vez maior. Através da utilização dos ensaios não destrutivos, existe a possibilidade de inspecionar os materiais e estruturas sem danificá-los e até mesmo sem interferir na sua vida em serviço.

A inspeção por ensaios não destrutivos avalia os aspectos de uniformidade e qualidade dos materiais e estruturas inspecionados. É buscada a detecção e o dimensionamento de discontinuidades, e assim poder avaliar se essas discontinuidades são defeitos importantes e se há risco de parada do serviço realizado pelo equipamento inspecionado ou não.

Dentre os ensaios não destrutivos, o ensaio por ultrassom tem recebido maior atenção nos últimos anos. Tem sido muito utilizado devido a sua versatilidade para trabalho de campo e a possibilidade de diagnóstico da integridade do material por um inspetor quase que instantaneamente. O ultrassom tem por objetivo detectar defeitos e discontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou formas de materiais ferrosos ou não ferrosos [1].

A principal utilização do ultrassom na inspeção de metais é a detecção e caracterização de falhas internas, às vezes, também é utilizado para detectar discontinuidades na superfície, para medida de espessura e extensão da corrosão, e, menos frequentemente para determinar propriedades físicas, estrutura, tamanho de grão e constantes elásticas [2].

Na área de petróleo e gás, a corrosão tem sido o grande problema a ser evitado e controlado. A sua causa principal é a condição termodinâmica instável que os metais apresentam e a tendência a mudar para uma condição estável pela formação de óxidos, hidróxidos, sais, etc. Dessa forma, a corrosão é um acontecimento natural e espontâneo, o qual transforma os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho se tornam insatisfatórios. Para evitar, ou ainda melhor, minimizar essa tendência termodinâmica dos metais, dispõe-se de vários métodos de proteção contra corrosão [3].

Do ponto de vista industrial, tanto o ferro como o aço-carbono assumem primordial importância devido à aplicação ampla, contudo, ambos carecem de proteção contra a corrosão. O filme do produto da oxidação que se forma em suas superfícies, seja em meios atmosféricos, seja em ambientes químicos, é o oposto dos filmes auto protetores encontrados em outros materiais metálicos. É de formação descontínua, permeável, com tendência a crescer indefinidamente até a completa degradação do material metálico. Daí a necessidade de proteção, sendo usual o emprego de revestimentos [3].

Revestimentos ditos de altíssimo desempenho têm sido especificados para equipamentos na indústria do petróleo. As razões principais para a utilização desses produtos são:

- 1- Aumentar os intervalos de tempo entre paradas para manutenção.
- 2- Resistir a condições severas de alta temperatura e contato prolongado com petroquímicos.
- 3- Minimizar a utilização de materiais nobres como aço super duplex, substituindo-os por materiais de mais baixo custo, que quando revestidos talvez possam apresentar tempo de vida útil semelhante.

Este projeto tem por objetivo avaliar as técnicas de ultrassom focalizado e ultrassom por ondas superficiais para a detecção e avaliação de defeitos em placas de aço carbono revestidas de forma a aprimorar a qualidade das inspeções. Esses defeitos foram inseridos no material de forma proposital. A adequação da técnica de inspeção com suas dificuldades na detecção desses tipos de defeitos será discutida ao longo do presente trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Ensaio por Ultrassom

O ensaio por ultrassom é um método não destrutivo, no qual um feixe sônico de alta frequência é introduzido no material a ser inspecionado através de um transdutor acoplado ao aparelho com o objetivo principal de detecção de defeitos ou discontinuidades internas ou superficiais. O som que percorre o material é refletido pelas interfaces, detectado pelo transdutor e analisado pelo inspetor que determina a existência ou não de discontinuidades no material [2].

A inspeção por ultrassom é um eficiente instrumento para avaliação do módulo de elasticidade, resistência, rigidez e outros parâmetros que são vitais para análise e dimensionamento de estruturas [4]. Portanto, o exame ultrassônico, tal como todo ensaio não destrutivo, visa reduzir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidade.

Assim como todo ensaio não destrutivo, o ensaio ultrassônico possui vantagens e limitações nas aplicações, como segue [2]:

Vantagens em relação a outros ensaios:

- Alta sensibilidade, permitindo a detecção de falhas extremamente pequenas, na ordem de 0,5mm ou menores tanto superficiais como internas;
- Precisão maior que outros métodos não destrutivos na determinação da posição de discontinuidades internas, estimando seu tamanho, e caracterizando a sua orientação, forma e natureza;
- Apenas uma superfície precisa ser acessível;
- A operação é eletrônica, que fornece resposta quase instantânea aos indícios de discontinuidades. Isso torna o método adequado para o acompanhamento em linha de produção e controle do processo;
- Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários;

- Não gera efeitos prejudiciais para o operador ou para pessoas próximas, nem aos equipamentos e materiais;
- Varredura volumétrica da peça, possibilitando a inspeção desde uma superfície até a superfície oposta;
- Portabilidade.

Limitações em relação a outros ensaios:

- O método manual exige muita atenção por técnicos qualificados para execução e avaliação dos resultados;
- Peças de forma irregular, com superfície rugosa, muito pequenas ou finas, ou não homogêneas são difíceis de inspecionar;
- Acoplantes são necessários para proporcionar efetiva transferência de energia das ondas ultrassônicas entre transdutores e peças que estão sendo inspecionadas;
- Blocos padrões e de referência são necessários, tanto para calibrar o equipamento e para a caracterização de descontinuidades;
- Possibilidade de existência de alto poder de atenuação do sinal de ultrassom para certos tipos de materiais (fibra, emulsões e misturas), necessidade de processamento de sinais de alta frequência, direcionamento do feixe, e complexidade do campo ultrassônico;
- Descontinuidades muito próximas da superfície podem não ser detectadas.

2.1.1. Tipos de Ondas

Ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que se propagam em um meio através da oscilação de partículas atômicas e moleculares deste. Todos os materiais contêm átomos que possuem a capacidade de oscilar em torno de sua posição de equilíbrio de forma elástica sempre retornando as suas posições originais. Devido às forças interatômicas que existem entre as partículas próximas, o deslocamento de uma partícula

induz o deslocamento das partículas vizinhas, e assim por diante, propagando uma onda elástica [2].

Com base no modo de deslocamento da partícula, ondas ultrassônicas são classificadas como ondas longitudinais, ondas transversais, ondas de superfície e ondas de Lamb [11]. Estes quatro tipos serão descritos a seguir.

Ondas Longitudinais

Chamadas também de ondas de compressão, é o tipo de onda ultrassônica mais amplamente usada na inspeção de materiais.

Nelas as partículas oscilam na direção de propagação da onda, podendo ser transmitidas a sólidos, líquidos e gases.

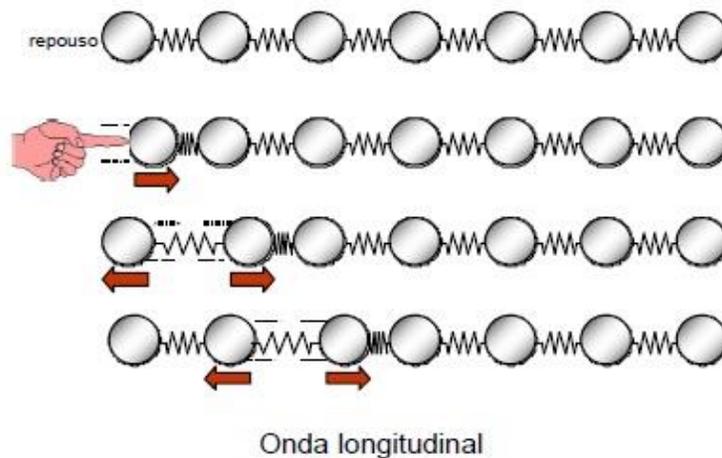


Figura 1: Modo de propagação das ondas longitudinais [1].

Na figura 1 nota-se que o primeiro plano de partículas vibra e transfere sua energia cinética para os próximos planos de partículas que passam a oscilar. Dessa maneira, todo o meio elástico vibra na mesma direção de propagação da onda (longitudinal) e aparecerão “zonas de compressão” e “zonas diluídas”. As distâncias entre duas zonas de compressão determinam o comprimento de onda (λ) [1].

Devido ao processo de propagação, esse tipo de onda possui uma alta velocidade de propagação, característica do meio [1]. Na tabela 1 são dadas velocidades para alguns materiais.

Tabela 1: Velocidades de propagação das ondas longitudinais [1].

Material	Velocidade m/s
Ar	330
Alumínio	6300
Cobre	4700
Ouro	3200
Aço	5900
Aço inoxidável	5800
Nylon	2600
Óleo(SAE30)	1700
Água	1480
Prata	3600
Titânio	6100
Níquel	5600
Tungstênio	5200
Magnésio	5.800
Acrílico	2.700
Aço Inoxidável	5.800
Aço Fundido	4.800

Ondas Transversais

Conhecidas como ondas de cisalhamento, também são muito usadas na inspeção ultrassônica de materiais.

Uma onda transversal é definida, quando as partículas do meio vibram na direção perpendicular à de propagação, como visto na figura 2. Neste caso, observamos que os planos de partículas mantêm-se na mesma distância um do outro, movendo-se apenas verticalmente [1].

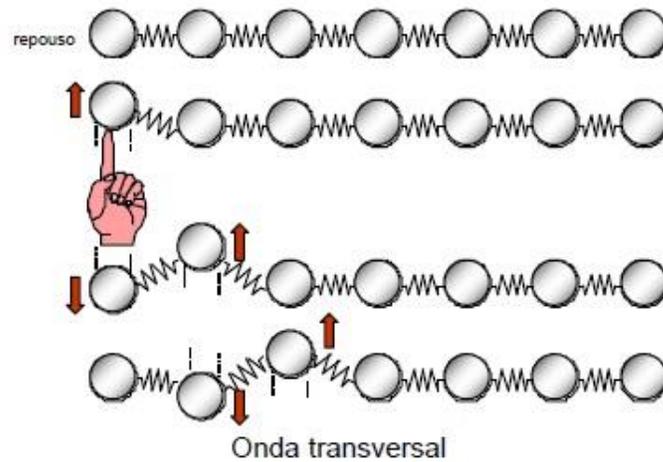


Figura 2: Modo de propagação das ondas transversais [1].

As partículas oscilam na direção transversal à direção de propagação, podendo ser transmitidas somente a sólidos. As ondas transversais são praticamente incapazes de propagar nos líquidos e gases, pela característica das ligações entre partículas desses meios. O comprimento de onda é a distância entre dois “vales” ou dois “picos” [1].

Tabela 2: Velocidades de propagação das ondas transversais [1].

Material	Velocidade m/s
Ar	-
Alumínio	3100
Cobre	2300
Acrílico	1100
Alumínio	3100
Ouro	1200
Aço	3200
Aço Inoxidável	3100
Aço Fundido	2400
Nylon	1100
Óleo(SAE30)	-
Água	-
Prata	1600
Titânio	3100
Níquel	3000
Magnésio	3000

Para propagação desse tipo de onda é necessário que as partículas apresentem uma grande força de atração com as partículas próximas, como acontece com os materiais sólidos. Nos líquidos e gases as ondas transversais não podem se propagar em razão da pequena força de coesão entre as partículas. A velocidade das ondas transversais é de aproximadamente 50% da velocidade da onda longitudinal no mesmo meio como visto na tabela 2 [2].

Ondas Superficiais

Também conhecidas como ondas de Rayleigh, são assim chamadas, pois se propagam apenas na superfície dos sólidos. Devido ao movimento oblíquo que provoca nas partículas da superfície, a velocidade de propagação da onda superficial entre duas fases diferentes é 90% da velocidade da onda transversal no mesmo material. As ondas de superfície estão sujeitas a atenuação em um dado material, como estão as ondas longitudinais ou transversais [5].

Ondas superficiais se propagam ao longo de uma interface fluido-sólido e tem sido um meio efetivo para detectar defeitos subsuperficiais e superficiais. Estudos com ondas superficiais têm sido relatados durante os últimos 40 anos [6, 7].

A propagação desse tipo de onda ocorre ao longo de uma superfície limitada de um lado pelas fortes forças elásticas de um sólido e de outro lado pelas forças elásticas praticamente desprezíveis entre as moléculas de um gás. Ondas superficiais perdem energia em acoplantes líquidos e não existem para sólidos imersos em líquido, ao menos que o líquido forme somente uma fina camada na superfície do sólido. [5].

A velocidade das ondas de Rayleigh se propagando em um revestimento depende da frequência das ondas, espessura do revestimento e as propriedades tanto do revestimento quanto do substrato. A região que as ondas se propagam não é mais espessa do que um comprimento de onda abaixo da superfície do metal. Nessa profundidade a energia é 4% da energia da onda na superfície, e a amplitude da oscilação decai até valores insignificantes em grandes profundidades [5,8].

Ondas de Rayleigh podem inspecionar áreas que tenham superfícies complexas que outras ondas podem ter dificuldade para inspecionar. Desde que o raio de curvatura

não exceda um comprimento de onda, entretanto cantos vivos podem não refleti-las totalmente [2].

A oscilação de partículas geralmente segue uma órbita elíptica, como mostra a figura 4. O maior eixo da elipse é perpendicular à superfície ao longo da qual as ondas estão propagando. O eixo menor é paralelo à direção de propagação [5]. Ondas de superfície podem existir em formas complexas que são variações da forma de onda simplificada ilustrada na figura 3.

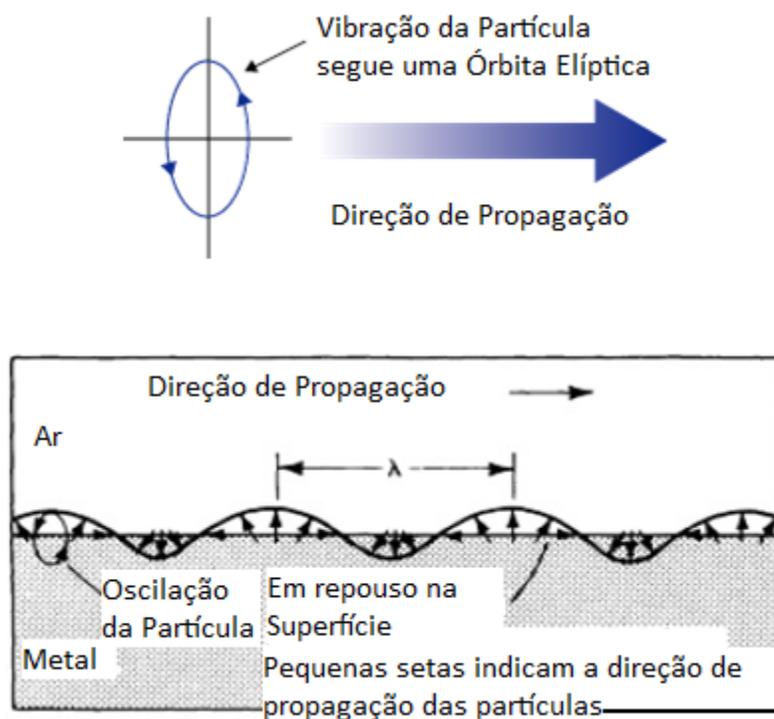


Figura 3: Diagrama de propagação das ondas de superfície (Rayleigh) na superfície do metal na interface metal/ar. O comprimento de onda λ é à distância correspondendo a um ciclo completo (Adaptado de [5, 9]).

Ondas de Lamb

São conhecidas também como ondas de placa e se propagam em chapas (feitas de compósitos ou metais) com apenas alguns comprimentos de onda de espessura. Uma

onda de Lamb consiste de uma vibração complexa que propaga paralelo a superfície em toda a espessura do material. As características de propagação dependem da densidade, propriedades elásticas e estrutura do material, bem como da espessura da peça de teste e da frequência [5].

Existem duas formas básicas de ondas de Lamb:

- Simétrica, ou de dilatação;
- Assimétrica, ou flexão.

A forma é determinada pelo tipo de movimento da partícula ser simétrico ou assimétrico, com relação ao eixo neutro da peça de teste.

Em ondas de Lamb simétricas (de dilatação), existe um deslocamento de compressão da partícula ao longo do eixo neutro da placa e um deslocamento elíptico da partícula em cada superfície (Fig. 5a). Em ondas de Lamb assimétricas (flexão), existe um deslocamento de cisalhamento da partícula (transversal) ao longo do eixo neutro da placa e um deslocamento elíptico da partícula em cada superfície, como visto na figura 4. A razão entre o maior e o menor eixo da elipse é função do material no qual a onda está sendo propagada [5].

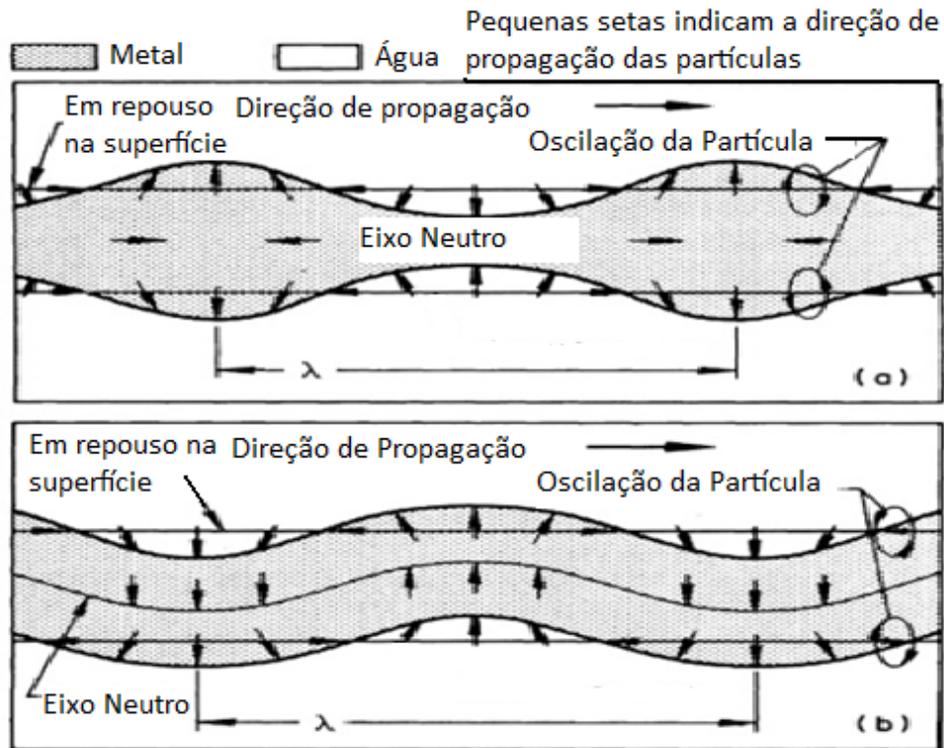


Figura 4: As duas formas das ondas de Lamb, simétrica (a) e assimétrica (b) (Adaptado de [5]).

2.1.2. Efeito Piezoelétrico

O efeito piezoelétrico é a maneira mais usual de geração de ondas ultrassônicas, sua base está no fato de que certos materiais geram corrente elétrica quando deformados mecanicamente. A capacidade de se expandirem ou comprimirem em resposta a aplicação de uma diferença de potencial externa ou, reciprocamente, produzirem uma polarização dielétrica em resposta a uma deformação externa ao material faz com que sejam chamados de materiais piezoelétricos [2,9]. O efeito piezoelétrico pode ser visto na figura 5.

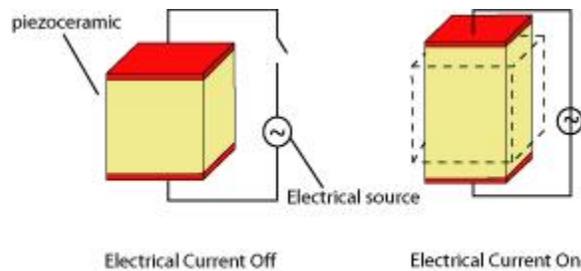


Figura 5: Efeito Piezoelétrico [9]

A conversão de pulsos elétricos em vibrações mecânicas e de vibrações mecânicas em energia elétrica é a base do método ultrassônico. Materiais piezoelétricos são encontrados mais comumente na forma de cristais e por transformarem energia de um tipo em outro são chamados de transdutores. Este componente é responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam nos materiais [2].

Tal fenômeno é obtido aplicando-se eletrodos no cristal piezoelétrico com tensão elétrica alternada da ordem de centenas de Volts, de maneira que o mesmo se contrai e se estende ciclicamente. Se tentarmos impedir esse movimento a placa transmite esforços de compressão as zonas adjacentes, emitindo uma onda longitudinal, cuja forma depende da frequência de excitação e das dimensões do cristal [1].

O elemento ativo da maioria dos transdutores acústicos utilizados hoje é uma cerâmica piezoelétrica, que pode ser cortada de várias maneiras para produzir modos de onda diferentes [9].

2.1.3. Tipos de Transdutores

Transdutor é um importante componente eletromecânico de um sistema de instrumentação ultrassônico. São fabricados para um vasto campo de aplicações e podem ser fabricados de forma exclusiva para determinado uso, se necessário. Fatores como sensibilidade e poder de penetração dependem diretamente do transdutor a ser utilizado na inspeção. Deve-se tomar cuidado quanto à seleção do transdutor adequado para a aplicação. Não é difícil perceber o quão é importante escolher transdutores que tenham a frequência desejada, e focando na capacidade de aperfeiçoar a inspeção.

Transdutores são classificados de acordo com a sua aplicação e o tipo de onda gerada. Abaixo os tipos de transdutores mais usuais.

-Classificação quanto à aplicação:

Transdutores de contato [9]: são usados para as inspeções de contato direto, e são geralmente manipulados com a mão, devem possuir geometria adequada à manipulação. Eles têm elementos protegidos em uma resistente caixa para suportar esforços mecânicos, principalmente abrasivos. Estes transdutores têm um formato para que eles sejam fáceis de segurar e de mover-se ao longo de uma superfície. Eles também costumam ter placas de desgaste substituível para prolongar sua vida útil. Materiais acoplantes como água, graxa, óleos ou alguns outros tipos de materiais comerciais são usados para remover o espaço de ar entre o transdutor e o componente inspecionado. A figura 6 ilustra a inspeção realizada com esse tipo de transdutor.



Figura 6: Inspeção realizada com transdutor de contato (Adaptado de [9]).

Transdutores de imersão [9]: são projetados para operar em ambiente líquido de forma que não entrem em contato com o componente a ser inspecionado. Frequentemente são empregados em tanques de água, portanto todas as conexões são a prova d'água. Os transdutores são ajustados para conseguir mais energia sônica dentro do ambiente líquido, logo do componente a ser inspecionado. Também é possível serem focalizados com lentes cilíndricas, planares ou esféricas. Um transdutor focalizado pode melhorar a sensibilidade e a resolução axial pela concentração da energia sônica em

pequenas áreas, tornando-se um método útil de inspeção. A figura 7 ilustra a inspeção realizada com esse tipo de transdutor.

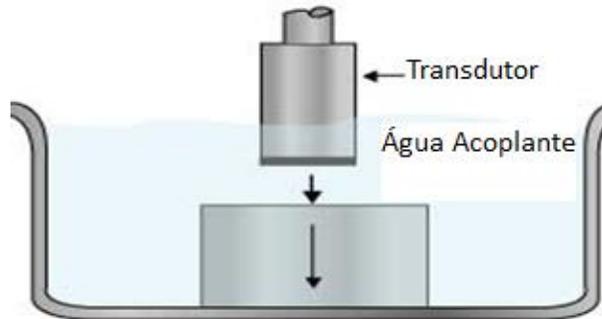


Figura 7: Inspeção realizada com transdutor de imersão (Adaptado de [9]).

-Classificação quanto ao tipo de onda gerada:

Transdutores retos ou normais [1]: são assim chamados os cabeçotes monocristal geradores de ondas longitudinais normais à superfície de acoplamento. Sua formação parte de um cristal piezoelétrico alocado entre uma cunha, paralela à superfície do material em inspeção, e um bloco rígido chamado de amortecedor. A cunha impede o contato direto do cristal com a superfície do material a ser inspecionado. O bloco amortecedor tem a função de dar suporte ao cristal e ainda absorver as ondas emitidas pela face junto a ele. O transdutor emite um pulso de onda ultrassônica que atravessa o material a inspecionar, e reflete nas interfaces, dando origem ao que chamamos ecos. Em geral, os transdutores normais são circulares, com diâmetros de 5 a 24 mm, com frequência de 0,5; 1; 2; 2,5; 5 e 6 MHz. Outros diâmetros e frequências existem, porém para aplicações especiais. A figura 8 apresenta a configuração desse transdutor.

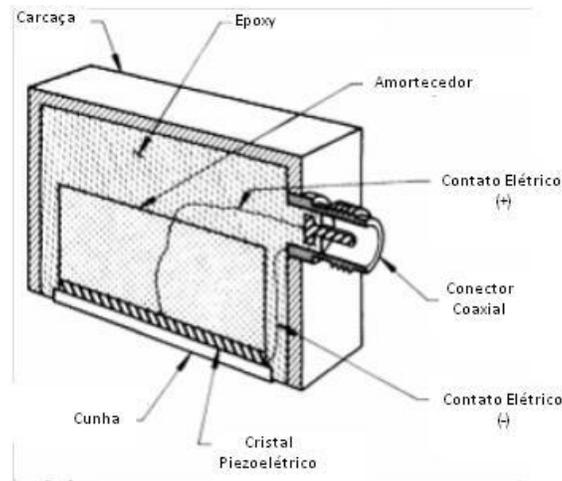


Figura 8: Transdutor Normal (Adaptado de [10]).

Transdutores angulares [1,9]: diferem dos transdutores retos pelo fato do cristal formar um determinado ângulo com a superfície do material. Este ângulo é conseguido com o uso de uma cunha de plástico entre o cristal piezoelétrico e a superfície. O ângulo nominal, sob o qual o feixe ultrassônico penetra no material vale somente para inspeção de peças em aço. Se o material for outro, deve-se calcular o ângulo real de penetração utilizando a Lei de Snell. A mudança do ângulo deve-se à mudança de velocidade no meio. O cristal piezoelétrico somente recebe ondas ou impulsos ultrassônicos que penetram na cunha em uma direção paralela à de emissão, em sentido contrário. A cunha de plástico funciona como amortecedor para o cristal piezoelétrico após a emissão dos impulsos. A figura 9 apresenta a configuração desse transdutor.

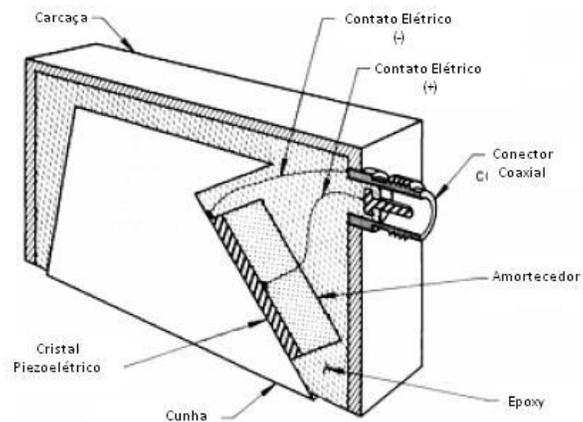


Figura 9: Transdutor Angular (Adaptado de [10]).

Transdutores Duplo-Cristal [1,2]: Existem problemas de inspeção que não podem ser resolvidos nem com transdutores retos nem com angulares. A dificuldade de detecção de descontinuidades próximas à superfície foi superada com os transdutores de duplo-cristal. Quando se trata de inspecionar ou medir materiais de reduzida espessura, ou quando se deseja detectar descontinuidades logo abaixo da superfície do material, a “zona morta” existente na tela do aparelho impede uma resposta clara. O cristal piezoelétrico recebe uma “resposta” num espaço de tempo curto após a emissão, não tendo suas vibrações sido amortecidas suficientemente. Neste caso, um transdutor duplo cristal pode ajudar a inspeção. Nesses transdutores dois cristais são incorporados. Cada um deles é isoladamente responsável pela emissão e recepção. Eles são separados por um material acústico isolante e levemente inclinados em relação à superfície de contato. Os cristais são montados sobre blocos de plástico especial de baixa atenuação. Devido a esta inclinação, os transdutores duplos não podem ser usados para qualquer distância (profundidade). Possuem sempre uma faixa de inspeção ótima, que deve ser observada. A figura 10 apresenta a configuração desse transdutor.

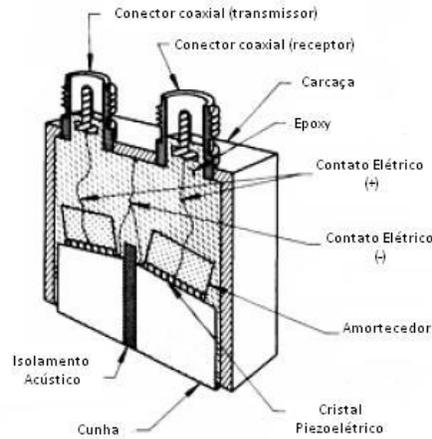


Figura 10: Transdutor Duplo-Cristal (Adaptado de [11])

2.1.4. Fatores que Afetam a Inspeção

Abaixo serão descritos alguns dos principais fatores que afetam a inspeção ultrassônica.

2.1.4.1. Impedância Acústica

A impedância acústica de um meio está relacionada com a resistência ou em outras palavras, a dificuldade que o meio imprime à passagem do som. É definida como o produto da densidade do material pela velocidade do som no mesmo.

$$Z = \rho \cdot V$$

Quando o feixe sonoro atravessa uma interface entre dois meios com diferentes impedâncias, parte da energia sonora é refletida e parte é transmitida para o segundo meio. A característica que define a quantidade de reflexão é a impedância acústica dos dois materiais. Quando a impedância acústica de dois meios é igual, não há reflexão e a onda é totalmente transmitida ao segundo meio.

Impedância acústica é importante [9]:

- Na determinação da transmissão e reflexão acústica na fronteira de dois materiais tendo impedância acústica diferente.
- Na avaliação da absorção do som em um meio.
- No projeto de transdutores.

A energia refletida é o quadrado da diferença dividida pela soma da impedância acústica de dois materiais [9]:

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

Energia do som transmitida + Energia do som refletida = 1

2.1.4.2. Campo Próximo ou Zona de Fresnel

Nas proximidades do cristal piezoelétrico existe uma região com grande interferência ondulatória denominada campo próximo ou zona de Fresnel. Ele representa para efeitos práticos, uma dificuldade na avaliação ou detecção de pequenas discontinuidades, isto é, menores que o diâmetro do transdutor, situadas nesta região próxima do transdutor. Portanto, o inspetor de ultrassom deve ficar atento a este problema [12].

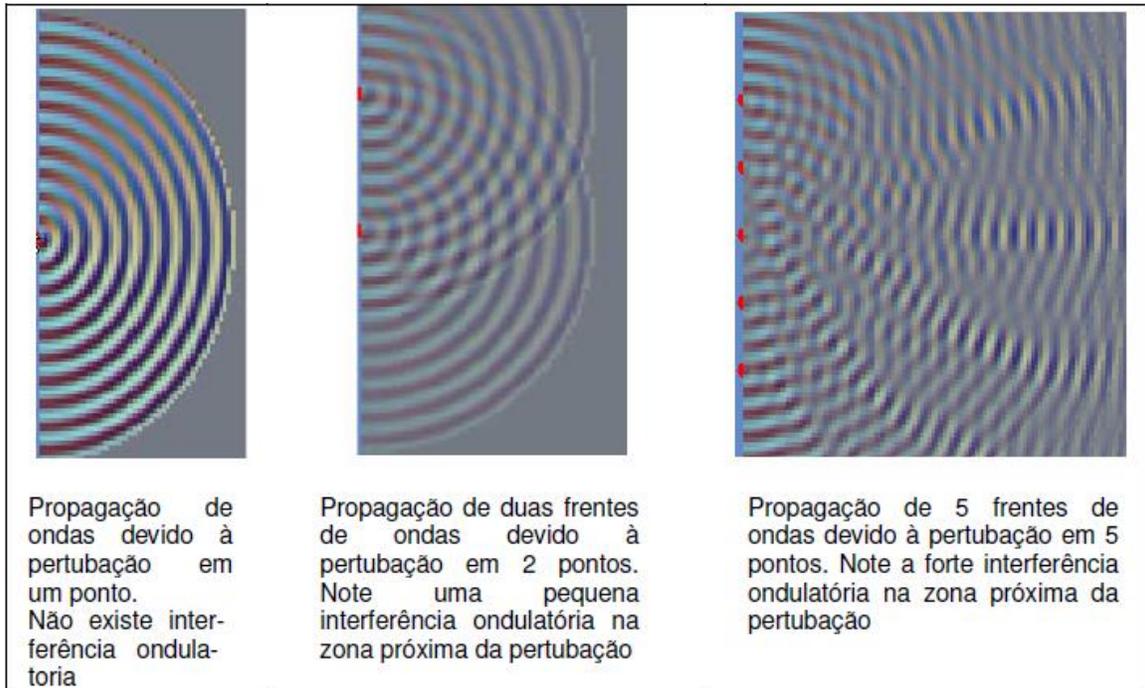
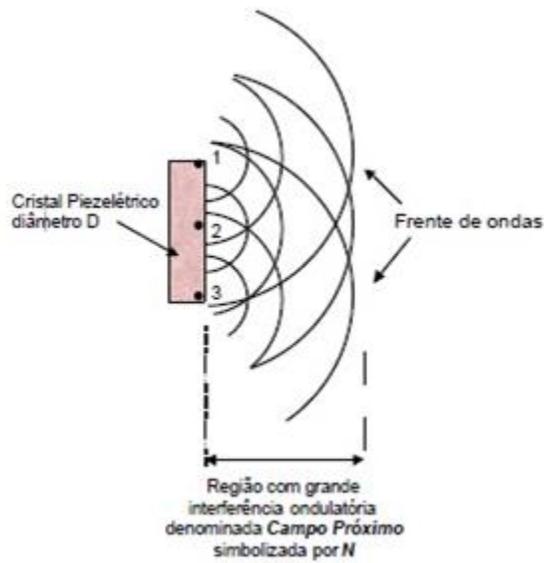


Figura 11: Campo sônico nas proximidades do cristal [1].

A figura 11 ilustra a região denominada campo próximo, note que nesta região próxima ao cristal há uma grande interferência ondulatória entre as ondas provenientes dos pontos 1, 2 e 3. À medida que nos afastamos do cristal, as interferências vão diminuindo e desaparecendo, tornando uma só frente de onda [1].

2.1.4.3. Campo Distante ou Zona de Fraunhofer

A região seguinte ao campo próximo é o campo longínquo também denominado pela literatura especializada de Campo Distante. Nesta região a onda sônica se diverge igual ao feixe de luz de uma lanterna em relação ao eixo central e ainda diminui de intensidade aproximando-se do inverso do quadrado da distância [1].

Devido ao campo distante, ao campo próximo e ao fenômeno de divergência, o campo sônico tem a forma vista na figura 12.

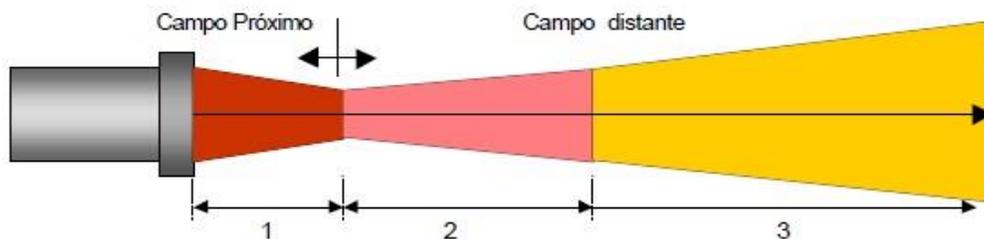


Figura 12: Classificação teórica das zonas do campo sônico [1].

O campo sônico de um transdutor pode ser dividido em três zonas distintas: na região 1, pequenas discontinuidades são mais difíceis de serem detectadas (campo próximo), na região 2, discontinuidades maiores podem ser detectadas e na região 3 é onde qualquer discontinuidade compatível com o comprimento de onda pode ser detectada [1].

2.1.4.4. Atenuação Sônica

A onda ultrassônica, ao percorrer um material qualquer, sofre em sua trajetória efeitos de dispersão e absorção, resultando na redução da sua energia durante o seu percurso.

A dispersão deve-se ao fato da matéria não ser totalmente homogênea, contendo interfaces naturais de sua própria estrutura ou processo de fabricação.

O fenômeno da absorção ocorre sempre que uma vibração acústica percorre um meio elástico. É a energia cedida pela onda para que cada partícula do meio execute um movimento de oscilação, transmitindo a vibração às outras partículas do próprio meio.

Portanto, o resultado dos efeitos de dispersão e absorção quando somados resultam na atenuação sônica. Na prática, este fenômeno poderá ser visualizado, quando observamos na tela do aparelho de ultrassom, vários ecos de reflexão de fundo provenientes de uma peça com superfícies paralelas. As alturas dos ecos diminuem com a distância percorrida pela onda.

O fenômeno da atenuação é importante quando inspecionamos peças em que este fator pode inviabilizar o ensaio [1].

2.1.4.5. Acoplantes

Quando acoplamos o transdutor à peça a ser ensaiada, imediatamente forma-se uma camada de ar entre a sapata do transdutor e a superfície da peça. Essa camada de ar evita que as vibrações mecânicas criadas pelo transdutor se propaguem para a peça, em virtude das características acústicas (impedância acústica) muito diferentes entre o ar e o material a ser inspecionado.

Como exemplo, podemos citar que a interface água e aço apenas transmite 12% e reflete 88% da energia ultrassônica. Por esta razão, deve-se usar um líquido que estabeleça uma redução desta diferença, e permita a passagem das vibrações para a peça. Tais líquidos, denominados líquidos acoplantes, são escolhidos em função do acabamento superficial da peça, condições técnicas, tipo da peça [1]. A tabela 3 mostra os acoplantes mais comumente utilizados.

Tabela 3: Impedância acústica, velocidade da onda longitudinal e densidade de alguns materiais [1].

Impedância Acústica de Alguns Materiais e Acoplantes			
Acoplante	Densidade (g/cm ³)	Velocidade da onda long. (m/s)	Impedância Acústica (g/cm ² .s)
Óleo (SAE 30)	0,9	1700	1,5 x 10 ⁵
Água	1,0	1480	1,48 x 10 ⁵
Glicerina	1,26	1920	2,4 x 10 ⁵
Carbox Metil Celulose (15g/l)	1,20	2300	2,76 x 10 ⁵
Aço	7,8	5.900	46 x 10 ⁵
Ar ou gas	0,0013	330	0,00043 x 10 ⁵
Aço inoxidável	7,8	5.800	45,4 x 10 ⁵
Alumínio	2,7	6.300	17,1 x 10 ⁵
Acrílico	1,18	2.700	3,1 x 10 ⁵

2.1.5. Métodos de Inspeção

Dois métodos tradicionais distintos podem ser utilizados na inspeção por ultrassom convencional. Eles seriam a técnica por Pulso-Eco e a por Transmissão, que serão mais bem explicadas abaixo. Também será apresentada uma variação dessas duas, a técnica chamada de *Pitch-Catch*.

2.1.5.1. Método Pulso-Eco

Este método envolve a emissão de pulsos de energia sônica, que são introduzidos no material em intervalos regulares de tempo, através de um transdutor. Se os pulsos encontram uma superfície refletora, parte ou toda a energia é refletida e retorna ao transdutor, que converte as vibrações em energia elétrica e a transforma em sinal na tela do aparelho. É utilizado apenas um transdutor para emitir o pulso ultrassônico (emissor) e receber o eco refletido (receptor). A porcentagem de energia que é refletida é diretamente dependente do tamanho da superfície refletora em relação ao tamanho do feixe ultrassônico incidente. A direção do feixe refletido depende da orientação da superfície refletora em relação ao feixe incidente. A energia refletida é avaliada tanto pela

quantidade de energia refletida em uma determinada direção quanto pelo tempo decorrido entre a transmissão do pulso inicial e a recepção do eco [2,13].

O método pulso-eco é o mais utilizado, principalmente por ser um método de aplicação simples, exigindo poucos dispositivos ou equipamentos e requer o acesso a apenas uma das superfícies. Logo, encontra maior aplicabilidade em ensaios realizados em campo [2]. A figura 13 demonstra o método pulso-eco.

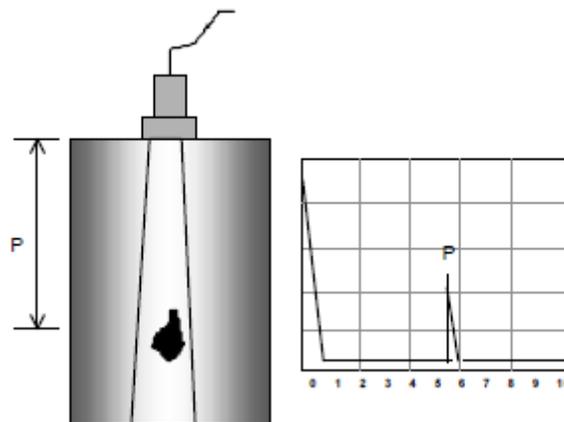


Figura 13: Inspeção realizada com o método pulso-eco [1].

2.1.5.2. Método por Transmissão

No método por transmissão, dois transdutores são utilizados. Os mesmos são posicionados na superfície oposta da peça, de forma que estejam perfeitamente alinhados, conforme visto na figura 14. Um transdutor atua como emissor e o outro como receptor das ondas ultrassônicas. Nesse tipo de inspeção, pode-se apenas detectar descontinuidades, sem dimensioná-las ou localizá-las. Devido à necessidade de um bom acoplamento e posicionamento preciso de um transdutor em relação a outro, o emprego do método em campo torna-se limitado [1,2].

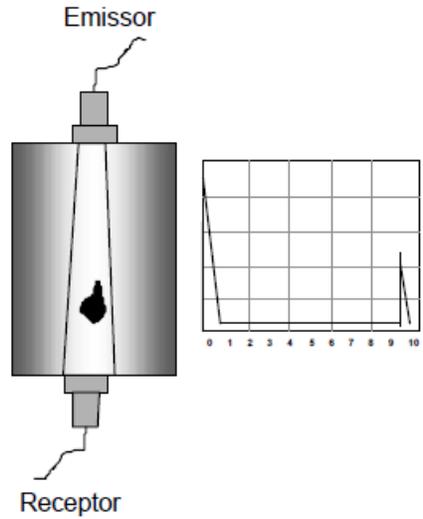


Figura 14: Método por Transmissão [1]

2.1.5.3. Método *Pitch-Catch*

O método *Pitch-Catch* usa um transdutor para emissão e outra para recepção. Os dois transdutores são posicionados na mesma face do corpo de prova e distanciados do comprimento a ser inspecionado, conforme visto na figura 15. Neste caso, a ocorrência de defeitos está vinculada a mudanças na forma do sinal e no tempo de percurso. Os transdutores têm de estar perfeitamente alinhados, para isso são utilizados suportes de fixação [14].

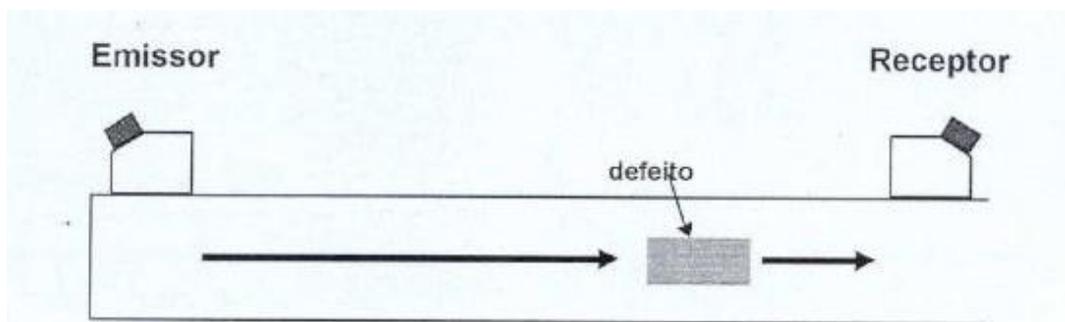


Figura 15: Método *Pitch-Catch* [14].

2.1.6. Avaliação dos Resultados

Dados de ultrassom podem ser coletados e mostrados em um número de diferentes formatos. Cada modo de apresentação fornece um tipo diferente de vista e avaliação da região do material sendo inspecionada. Sistemas computadorizados modernos de ultrassom podem mostrar dados em três formas de apresentações simultaneamente. Os três mais comuns serão citados a seguir [5,9].

Sinal A-Scan: Consiste na exibição da onda, na qual a amplitude do eco e tempo de percurso da onda são plotados em um gráfico simples com o eixo vertical representando a amplitude e o eixo horizontal representando o tempo. O sinal A-scan pode ser visualizado na figura 16.

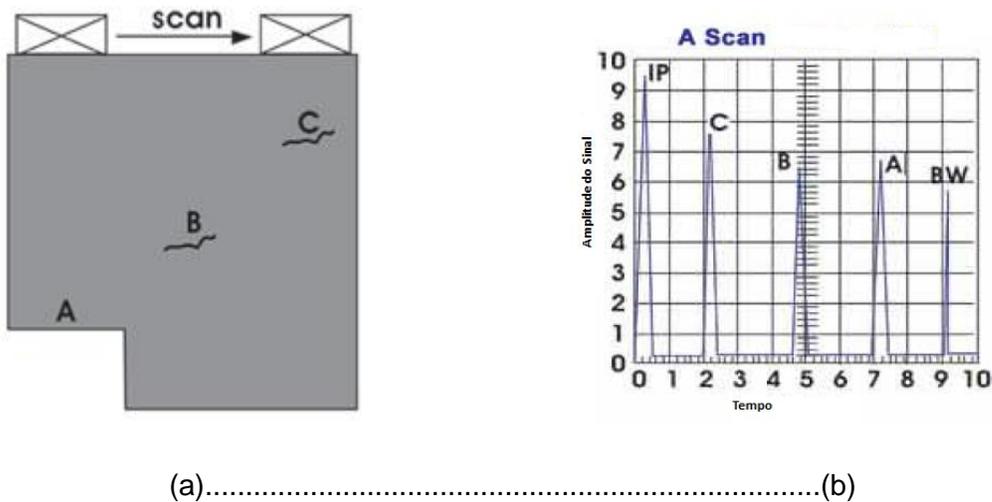


Figura 16: (a) Representação do corpo de prova inspecionado e (b) Apresentação de dados em formato A-scan, onde IP se refere ao pulso inicial e BW ao fundo da peça (Adaptado de [9]).

Sinal B-scan: Nessa configuração, a tela do aparelho reproduz uma vista transversal da amostra de acordo com a energia do sinal recebido, conforme visto na figura 17. No gráfico B-scan, o tempo de percurso da energia sonora é apresentado ao longo do eixo vertical e a posição linear do transdutor é apresentada ao longo do eixo

horizontal. A partir do B-scan, a profundidade do refletor e suas dimensões lineares aproximadas na direção de varredura podem ser determinadas.

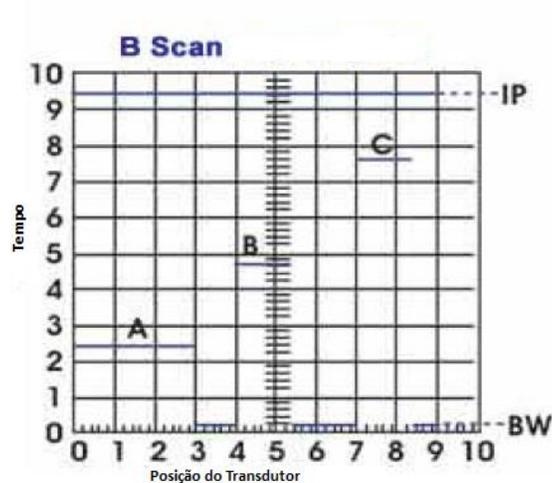


Figura 17: Apresentação de dados em formato B-scan (Adaptado de [9]).

Sinal C-scan: Os dados são apresentados em duas dimensões como uma vista superior ou planar de um corpo de prova, com a dimensão e posição das possíveis discontinuidades, conforme visto na figura 18. Para o ultrassom convencional, um scanner mecânico com codificadores é usado para controlar as coordenadas do transdutor para a resolução do sinal desejada.

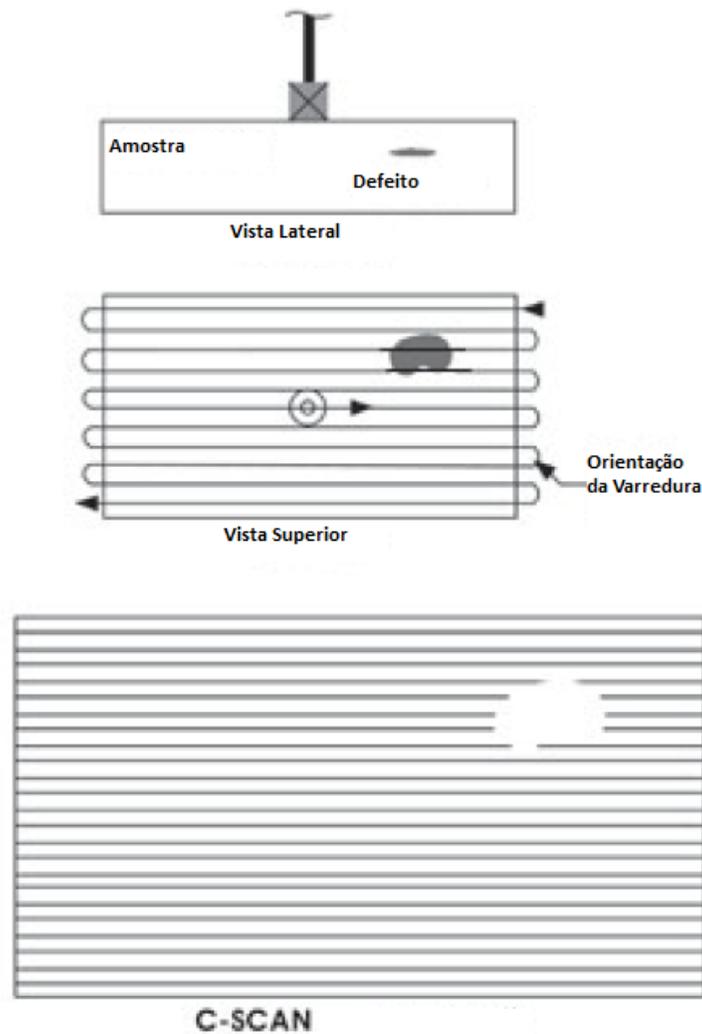


Figura 18: Apresentação de dados em formato C-scan (Adaptado de [9]).

2.1.7. Cuidados Iniciais com a Inspeção

Ensaio realizado por ultrassom só podem ser confiáveis após os devidos ajustes serem feitos, seguindo etapas necessárias. Algumas das variáveis que devem ser determinadas são: procedimento de calibração, blocos de referência, frequência de inspeção, tipo de transdutor, velocidade do meio, dentre outras. Abaixo os procedimentos mais relevantes são explicados.

2.1.7.1. Procedimento de Calibração

Sendo uma das etapas mais importantes do ensaio por ultrassom, a calibração refere-se ao ato de avaliar e ajustar a precisão e acurácia do equipamento a ser utilizado. Inúmeros materiais diferentes podem ser inspecionados com o mesmo equipamento, precisando de calibrações completamente diferentes. O sistema como um todo deve ser ajustado segundo procedimentos normalizados pelo cliente/fabricante. Por fim, espera-se que estejam determinados fatores como escala horizontal, ganho de inspeção, distinção entre defeitos e não defeitos, resolução e sensibilidade [1,2,9,10,15].

2.1.7.2. Blocos de Referência

Os blocos de referência são utilizados para estabelecer certo grau de consistência nas medidas e para ajudar a interpretar e qualificar a informação contida no sinal recebido pelo aparelho. A validação se o equipamento e a calibração obtêm os mesmos resultados de um dia para outro é garantida pelos blocos de referência [9].

Os blocos de referência, também chamados de “blocos padrões” ou “blocos de calibração” são utilizados na calibração da escala do aparelho. Nesses blocos todas as dimensões e formas são conhecidas e calibradas. Logo, os controles de velocidade e zero podem ser ajustados, juntamente até que os ecos de reflexão permaneçam na posição desejada na tela do aparelho. O seu material deve ser o mesmo da peça que será inspecionada, pois as posições dos ecos de reflexão são dependentes da velocidade de propagação da onda ultrassônica, que é característica intrínseca do meio [1,2,9].

2.1.7.3. Frequência de Inspeção

No teste de ultrassom o inspetor deve tomar uma decisão sobre a frequência do transdutor, que será usado. Como sabemos, mudando a frequência, quando a velocidade do som é mantida, resulta em uma mudança no comprimento de onda do som, como mostra a relação a seguir:

$$\text{Comprimento de onda } (\lambda) = \frac{\text{Velocidade } (v)}{\text{Frequência } (f)}$$

A equação acima permite calcular o comprimento de onda (metro/ciclo), pois a velocidade (metro/segundo) é em geral conhecida e depende somente do modo de vibração e do material, sendo uma constante, independente da frequência. Por outro lado a frequência (hertz, que é ciclo/segundo) depende somente da fonte emissora, que também é conhecida [1].

O comprimento de onda do ultrassom tem efeito significativo sobre a probabilidade de detectar uma descontinuidade. Uma regra de ouro da inspeção industrial é que descontinuidades que são maiores do que a metade do tamanho do comprimento de onda normalmente podem ser detectadas [9].

A sensibilidade é entendida como a dimensão do menor defeito passível de ser detectado no ensaio. A sua calibração é realizada de forma que sejam detectadas as descontinuidades importantes e desprezadas aquelas não significativas. A decisão que o inspetor toma para registrar ou não uma descontinuidade é baseada na altura do eco na tela do aparelho, que depende dentre outros fatores, das dimensões desta descontinuidade e de quanto sensível está sendo realizada a inspeção [1,2].

Sensibilidade, a qual já foi explicada acima, aumenta para frequências mais altas (menores comprimentos de ondas). Já a resolução é a capacidade do sistema para localizar descontinuidades que estão próximas dentro do material ou perto da superfície. A resolução aumenta com o aumento da frequência.

A frequência de onda também pode afetar a capacidade de uma inspeção de forma adversa. Selecionar a frequência de inspeção ideal muitas vezes envolve a manutenção de um equilíbrio entre os resultados favoráveis e desfavoráveis da seleção. Antes de selecionar uma frequência de inspeção, a estrutura de grãos, espessura do material, tamanho, tipo e local provável da descontinuidade devem ser consideradas [9].

2.2. Revestimentos Anticorrosivos

A causa básica da corrosão é a condição termodinâmica instável dos metais, os quais estão sempre tendendo a mudar para uma condição estável pela formação de óxidos, hidróxidos, sais, etc. A transformação ocorre em certas condições operacionais, sendo estas condições relacionadas à temperatura, pressão, esforços mecânicos e outras condições hidrodinâmicas, levando a deterioração do material. Com isso, pode-se dizer que a corrosão nada mais é que a transformação ou deterioração de um material devido a uma reação química ou eletroquímica com o meio [3].

Por ser um processo espontâneo, a corrosão nos materiais metálicos é vista como um processo inverso metalúrgico, ou de metalurgia extrativa. No processo de corrosão o metal, quando exposto a um meio contendo O_2 , CO_2 , H_2S , S , entre outros, produzirá compostos metálicos da mesma natureza do minério do qual o metal foi extraído, ou seja, formara compostos, óxidos por exemplo, que possuem uma energia menor do que a do metal, tornando a presença do óxido mais estável do que a do metal [3]. Este processo de corrosão em metais é ilustrado na figura 19.



Figura 19: Processo de corrosão em metais [3].

Desafios técnicos e os elevados custos causados pela corrosão tornam-se estímulos para os engenheiros e outros profissionais técnicos para estudar e compreender cada vez mais as bases fundamentais da corrosão. A identificação de

mecanismos de corrosão por si só já é um grande feito, mas também a descoberta de meios adequados para prevenir a corrosão e para prever o comportamento da corrosão de materiais metálicos em condições de serviço são muito importantes.. O estudo da corrosão pressupõe o estudo do seu controle concomitantemente, pois o próprio mecanismo de corrosão pode sugerir alguns modos de combate ao processo corrosivo [3, 16].

Os métodos práticos, adotados para diminuir a taxa de corrosão dos materiais metálicos, podem ser esquematizados segundo Vernon [17] da seguinte forma:

- Métodos baseados na modificação do processo;
- Métodos baseados na modificação do meio corrosivo;
- Métodos baseados na modificação do metal;
- Métodos baseados nos revestimentos protetores.

Há três principais modos de proteção contra a corrosão [3]:

- Proteção Catódica;
- Revestimentos anticorrosivos;
- Inibidores;
- Seleção de materiais nobres (alta resistência à corrosão).

A corrosão pode ter consequências diretas e indiretas, sendo algumas delas de natureza econômica. Os custos diretos são aqueles associados às perdas de materiais, produtos e equipamentos resultantes do processo de corrosão e também referente à inspeção de equipamentos e manutenção dos processos de proteção. Já os custos indiretos, são aqueles associados a acidentes, vazamentos e paradas não programadas durante a utilização do material [3].

O fator econômico é o primeiro a ser visto na hora da escolha de qual modo de proteção utilizar. Qualquer medida de proteção será vantajosa, economicamente, se o custo da manutenção baixar. Revestimento anticorrosivo é o modo de proteção anticorrosiva mais utilizado. Logo, demonstra a eficiência e custo superiores do revestimento frente às demais técnicas, aumentando assim a vida útil do material [3].

Neste projeto será dada ênfase a um único método de proteção à corrosão, que é através da utilização de revestimentos anticorrosivos aplicados em aços.

2.2.1. Cuidados prévios a aplicação do revestimento

A limpeza e preparação da superfície é uma das etapas mais importantes para que um revestimento apresente o desempenho esperado. Esta etapa consiste basicamente de criar condições que proporcionem aderência satisfatória aos revestimentos e remoção dos contaminantes da superfície, como produtos de corrosão, carepa de laminação, graxas, sais, óleos etc. As falhas mais comuns são empolamento da pintura, corrosão do substrato e perda de aderência dos revestimentos [3].

Portanto, como pode ser observada, a preparação de superfície é uma etapa essencial e que deve ser executada com bastante cuidado, para que se obtenha o grau de limpeza necessário. Caso contrário, o tempo de serviço dos revestimentos será drasticamente reduzido. Uma grande parte das falhas prematuras em revestimentos por pintura decorre de problemas nesta etapa [3].

É de absoluta necessidade a perfeita caracterização do tipo de proteção visado. Assim, o que pode ser indesejável para um determinado tipo de acabamento pode não ser nocivo, e até altamente desejável, em outro. São citados na literatura especializada casos da aplicação de tintas sobre camadas oxidadas, com bons resultados, tendo como condição que essa ferrugem esteja limpa, compacta e bem aderente à superfície metálica [3].

Pode-se, assim afirmar que não há um tratamento de preparação de superfícies metálicas de caráter universal. São diversas as variáveis, o tipo do metal, fim a que se destina, condições econômicas, além da quantidade e qualidade das impurezas ou sujidades a serem removidas [3].

Diante da necessidade de controle de qualidade relacionado às etapas de limpeza e preparação da superfície para um bom desempenho do revestimento, foram desenvolvidas normas internacionais que padronizam os processos de preparo com especificações precisas para esta etapa [3].

2.2.2. Revestimentos Não Metálicos Orgânicos

Existem três tipos de revestimentos: Metálicos, Não Metálicos Inorgânicos e Não Metálicos Orgânicos. Para o presente trabalho o último foi o utilizado. A aplicação de tintas ou esquemas de pinturas é um dos métodos de proteção anticorrosiva mais empregados devido a uma série de propriedades importantes, como [3]:

- Facilidade de aplicação e manutenção;
- Relação custo-benefício atraente;
- Finalidade estética – tornar o ambiente agradável;
- Auxílio na segurança industrial;
- Identificação de fluidos em tubulações e reservatórios;
- Sinalização;
- Impedir a incrustação de microorganismos marinhos em cascos de embarcações;
- Impermeabilização;
- Permitir maior ou menor absorção de calor, através do uso correto de cores;
- Diminuição da rugosidade superficial.

Apesar de a pintura ser uma técnica bastante antiga, o grande avanço tecnológico das tintas só ocorreu no século XX, em decorrência do desenvolvimento de novos polímeros (resinas). Atualmente, o desenvolvimento tecnológico neste setor tem sido intenso, não só em relação a novos tipos de resinas e de outras matérias-primas na fabricação de tintas, mas também, em relação a novos métodos de aplicação [3].

A pintura possui uma ampla variedade de aplicações, sendo classificada em [3]:

- Pintura artística;
- Pintura arquitetônica;
- Pintura Industrial.

Para o presente projeto será utilizada a pintura industrial com foco em sua propriedade mais importante, a qual é a proteção anticorrosiva seguida das propriedades já citadas, como sinalização, estética, impermeabilização, etc.

Quando se vai proteger uma estrutura ou um equipamento por meio de revestimentos por pintura, diz-se que este processo corresponde a aplicação de um esquema de pintura sobre a superfície a ser protegida, sendo este esquema de pintura um procedimento dentro do qual se especificam todos os detalhes técnicos envolvidos em sua aplicação, como [3]:

- O tipo de preparação e o grau de limpeza;
- As tintas de fundo (primer), intermediária e de acabamento a serem aplicadas;
- A espessura de cada uma das demãos de tintas;
- Os intervalos entre demãos e os métodos de aplicação das tintas;
- Os critérios para execução de retoques na pintura;
- Os ensaios de controle de qualidade a serem executados na pintura;
- As normas e os procedimentos a serem seguidos para cada atividade a ser realizada.

Um esquema de pintura para proteção anticorrosiva de estruturas metálicas ou de equipamentos é na maioria dos casos composto por três tipos de tintas: tinta de fundo ou primária (primer), tinta intermediária e tinta de acabamento. Nem sempre é necessária a tinta intermediária, podendo ser substituída por uma demão adicional da tinta de fundo ou da tinta de acabamento [3].

2.2.2.1. Constituintes das Tintas

Os constituintes fundamentais de uma tinta líquida são veículo fixo ou veículo não volátil (VNV), solventes (veículo volátil), pigmentos e aditivos. A seleção dos componentes de uma tinta é rígida, qualitativa e quantitativamente, a fim de que os requisitos técnicos desejados sejam obtidos [3].

O veículo fixo ou não volátil (VNV) é o constituinte ligante ou aglomerante das partículas de pigmento e o responsável direto pela continuidade e formação da película de tinta. O VNV é constituído por um ou mais tipos de resina, que em sua maioria são de natureza orgânica e responsáveis pela resistência da tinta [3].

Os solventes são substâncias puras empregadas tanto para auxiliar na fabricação das tintas, na solubilização da resina e no controle de viscosidade como em sua aplicação. Podem ser classificados em solventes verdadeiros, auxiliares ou falso solvente [3].

Os aditivos são compostos empregados, em pequenas concentrações, nas formulações das tintas com diferentes objetivos de lhes conferir, ou às películas, determinadas características que sem eles seriam inexistentes [3].

Os pigmentos são partículas sólidas, finamente divididas, insolúveis no veículo fixo, utilizados para se obter, entre outros objetivos, proteção anticorrosiva, cor, opacidade, impermeabilidade e melhoria das características físicas da película [3].

2.2.2.2. Propriedades das Tintas e Formação de Película

A maioria das propriedades físico-químicas da tinta depende da natureza química da resina presente em sua composição, pois a resina é o constituinte responsável pela formação da película de tinta. O mecanismo de secagem e formação de película é o processo pelo qual um filme de tinta, após a sua aplicação, se converte numa película sólida com as propriedades desejadas [3].

Neste projeto será dada ênfase às resinas do tipo epóxi, que constituem os revestimentos avaliados. Este tipo de resina é, sem dúvida alguma, um dos mais importantes veículos fixos com que se conta atualmente para um efetivo combate aos problemas de corrosão. Essa importância é derivada de suas boas propriedades de aderência e de resistência química, além de apresentarem alta resistência à abrasão e ao impacto [3].

Os revestimentos à base de resina epóxi podem apresentar-se em dois sistemas de secagem e formação da película: sistema de estufa e sistema de dois componentes. Para o presente projeto, o revestimento a ser avaliado é do sistema dois componentes. Nesse sistema, a formação do polímero entrecruzado é devido a reação entre a resina

epóxi e um agente endurecedor (agente de cura), que também é uma resina. A reação pode-se dar à temperatura ambiente e os endurecedores mais utilizados para tal sistema são as poliaminas e as poliamidas. Tintas de dois componentes são chamadas assim, pois a resina e o endurecedor são misturados pouco antes da aplicação. Após a mistura, a tinta tem um tempo no qual ela pode ser aplicada, depois desse tempo, a tinta endurece, não mais permitindo sua utilização. Num modo geral, este tipo de tinta de dois ou mais componentes apresentam excelentes propriedades mecânicas, como dureza, resistência à abrasão e ao impacto [3].

2.2.2.3. Seleção de Esquemas de Pintura

A seleção de um esquema de pintura não é uma tarefa fácil, pois existem vários fatores a considerar para se obter uma pintura técnica e economicamente satisfatória. Com isso, é importante o conhecimento adequado das características das tintas, bem como as informações a respeito das condições de uso da estrutura ou equipamento a ser revestido. Os fatores básicos que norteiam a especificação de um esquema de pintura são [3]:

- As condições prévias em que se encontra o equipamento ou a estrutura;
- As condições de exposição;
- O tipo de substrato a ser revestido;
- A facilidade de manutenção;
- A finalidade da pintura.

2.2.2.4. Falhas em Revestimentos Anticorrosivos

As funções básicas de um revestimento por pintura podem deixar de serem exercidas quando [3]:

- A vida útil do mesmo atingiu o seu limite máximo de durabilidade. Neste estágio, recomenda-se, então, executar os serviços de manutenção na pintura para que se obtenha novamente as propriedades desejadas;

- Devido a falhas prematuras no mesmo, oriundas de vários fatores relacionados com as diversas etapas de especificação e aplicação dos esquemas de pintura.

A razão mais preocupante é a ocorrência de falhas prematuras, pois além de comprometer as funções do revestimento, acarreta sérios prejuízos às empresas, tanto na natureza técnica (parada de equipamentos) como econômica (gastos adicionais para se fazer o trabalho). Diante de tal situação, para minimizar os riscos de ocorrência de falhas prematuras nos revestimentos por pintura, é importante considerar uma série de fatores, como [3]:

- O projeto dos equipamentos e das estruturas metálicas;
- As condições prévias do substrato;
- A preparação da superfície;
- A especificação do esquema de pintura;
- A aplicação das tintas.
- A qualidade e as características técnicas dos produtos;
- A realização dos serviços de manutenção.

2.3. Trabalhos anteriores

A grande dificuldade encontrada na realização do presente trabalho, foi não existir estudos na área de revestimentos anticorrosivos utilizando-se das técnicas de ultrassom focalizado e ultrassom por ondas superficiais. Logo, a revisão bibliográfica envolveu um trabalho mais amplo sobre ultrassom convencional.

Silva [18] testou as técnicas de ultrassom convencional e *phased array* nos mesmos corpos de prova de seis furos utilizados no presente trabalho. A técnica de *phased array* obteve bons resultados na detecção dos defeitos com auxílio de simulações computacionais anteriores aos ensaios. Já o ultrassom convencional não obteve grande sensibilidade na detecção de defeitos. O autor utilizou lentes para focalizar o feixe emitido e conseguiu melhorar a resolução, mas os resultados não foram satisfatórios. O autor sugeriu a utilização de transdutores focalizados, dando origem ao presente trabalho.

A figura 20 mostra a inspeção feita através do *phased array* em um exemplar dos corpos de prova também utilizados no presente trabalho. Os corpos de prova serão detalhados quanto a sua fabricação e especificação no próximo capítulo. É possível observar os defeitos detectados nos C-scans da figura 20, tanto os defeitos inseridos de furos maiores, quanto os de furos menores.

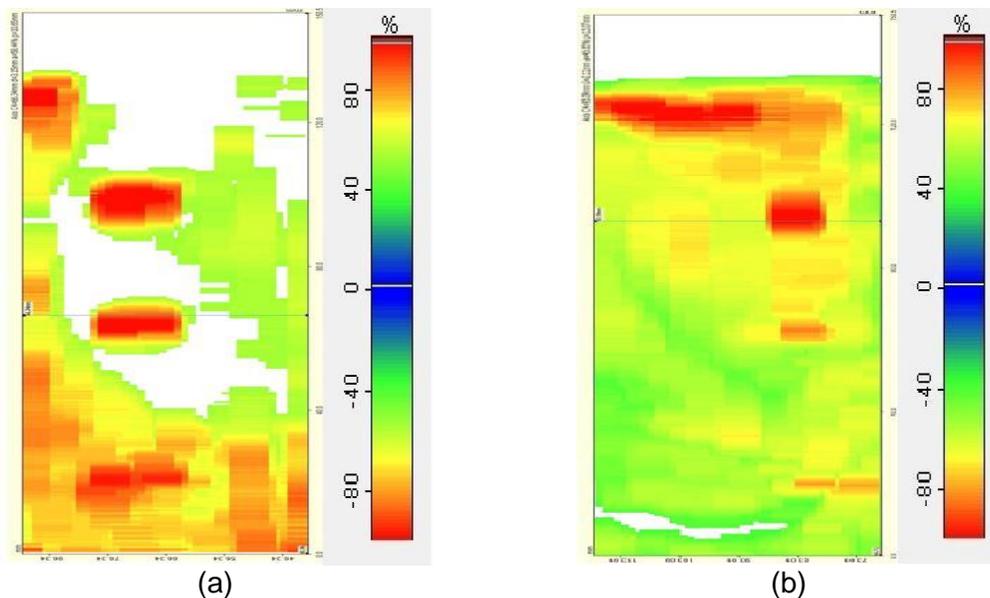


Figura 20: C-Scans obtidos através da inspeção por *phased array*. (a) Furos maiores e (b) Furos menores [18].

3. Materiais e Métodos

3.1. Introdução

O objetivo deste trabalho, como mencionado anteriormente, é estudar a viabilidade das técnicas de ultrassom focalizado e ultrassom por ondas superficiais para a detecção e avaliação de falhas em revestimentos anticorrosivos.

Este item do projeto abordará tanto os aspectos relacionados à fabricação dos corpos de prova e a simulação dos defeitos quanto os aspectos relacionados às configurações utilizadas para a realização do ensaio por ultrassom e as metodologias de pós-processamento utilizadas.

3.2. Corpos de Prova – Confecção e Características

Para o presente projeto, os corpos de provas preparados com defeitos controlados, ou seja, localização e dimensões conhecidas, foram divididos em dois grupos: Lote 1 e Lote 2.

O primeiro lote contém seis corpos de prova com seis defeitos controlados cada, já o segundo lote possui cinco corpos de prova com três defeitos controlados cada. Os defeitos inseridos buscam simular perda de espessura devido à corrosão localizada. Desse modo, os corpos de prova confeccionados reproduzem uma condição encontrada durante o uso em campo de revestimentos anticorrosivos, como por exemplo, nos tanques de armazenamento, quando há a real possibilidade de ocorrência de corrosão localizada na estrutura, ou seja, abaixo do revestimento, sendo impossível de visualizar qualquer indicação na superfície durante uma inspeção visual.

Tabela 4: Características dos lotes analisados dos corpos de prova de defeitos controlados

Nome do lote	Total de corpos de prova	Quantidade de defeitos por corpo de prova	Tipo de defeito inserido	Revestimento utilizado
Lote 1	6	6	Furo plano	A
			Furo cônico	B
Lote 2	5	3	Furo plano	A
			Furo cônico	

O defeito de perda de espessura do substrato devido a sua corrosão localizada foi reproduzido em dois tipos de revestimentos, denominados de revestimento A e B. Logo, pode-se estudar a influência do revestimento na detecção dos defeitos por ultrassom.

Nos dois lotes, foram utilizadas como substrato, placas de aço carbono de dimensões 150 mm de comprimento, 100 mm de largura e 4.7 mm de espessura e jateadas com microesferas de vidro. Os defeitos foram simulados com furos feitos de duas maneiras, a primeira através da utilização de uma fresa e a segunda através da utilização de uma furadeira. Logo, buscou-se avaliar se a morfologia influencia na detecção de defeitos. Os furos feitos com fresa apresentam profundidade constante e uniforme, sendo o seu fundo paralelo à superfície do substrato. Já os furos feitos com a furadeira não apresentam uma profundidade uniforme, pois seu fundo será de forma cônica e não mais paralelo à superfície como os furos feitos com fresa.

Outro parâmetro estudado será a influência do produto de corrosão (Fe_3O_4) dentro dos furos em alguns corpos de prova. No lote 1, dois corpos de prova tiveram seus furos preenchidos com o produto de corrosão e cobertos com o revestimento B. Para o lote 2, quatro corpos de prova foram produzidos com o produto inserido.

A figura 21 apresenta as placas de aço do Lote 1 já jateadas, antes da aplicação do revestimento. A tabela 5 apresenta as principais características dos corpos de prova referentes ao Lote 1.

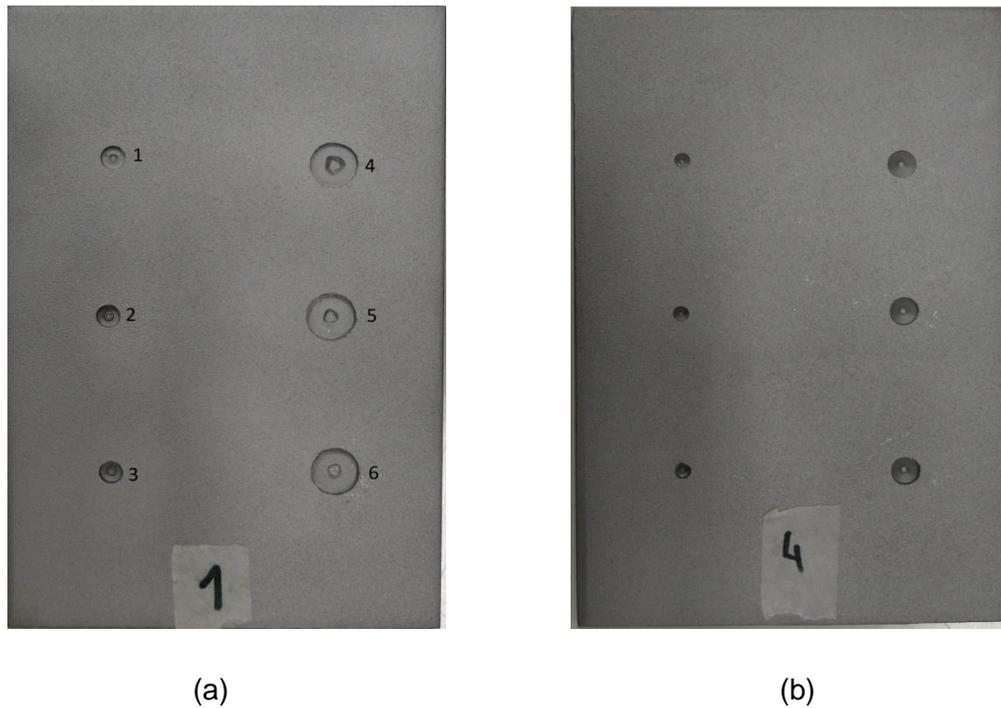


Figura 21: Placas de aço carbono do Lote 1 jateadas e com furos feitos com fresa (a) e com furadeira (b).

Tabela 5: Características dos corpos de prova do Lote 1.

Furo	Corpo de Prova 1 Revestimento A Furo Plano		Corpo de Prova 2 Revestimento B Furo Plano		Corpo de Prova 3 Revestimento B Furo Plano Produto de Corrosão	
	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)
1	5,45	1,50	5,41	1,00	5,15	1,96
2	5,25	2,30	5,36	1,90	5,20	2,21
3	5,25	2,80	5,26	2,37	5,15	2,86
4	10,75	1,50	11,20	1,53	11,04	1,88
5	11,0	2,15	11,20	1,93	10,96	2,14
6	10,84	2,70	11,24	3,00	10,85	2,73
Furo	Corpo de Prova 4 Revestimento A Furo Cônico		Corpo de Prova 5 Revestimento B Furo Cônico		Corpo de Prova 6 Revestimento B Furo Cônico Produto de Corrosão	
	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)
1	3,45	1,46	3,33	1,46	3,44	1,48
2	3,40	2,70	3,38	2,60	3,41	2,56
3	3,44	3,30	3,40	3,80	3,44	2,87
4	6,35	1,46	6,40	1,46	6,35	1,48
5	6,45	2,70	6,38	2,60	6,38	2,56
6	6,43	3,30	6,42	3,80	6,40	2,87

A figura 22 mostra as placas de aço do Lote 2 antes de serem revestidas. A tabela 3 apresenta as principais características dos corpos de prova referentes ao Lote 2.

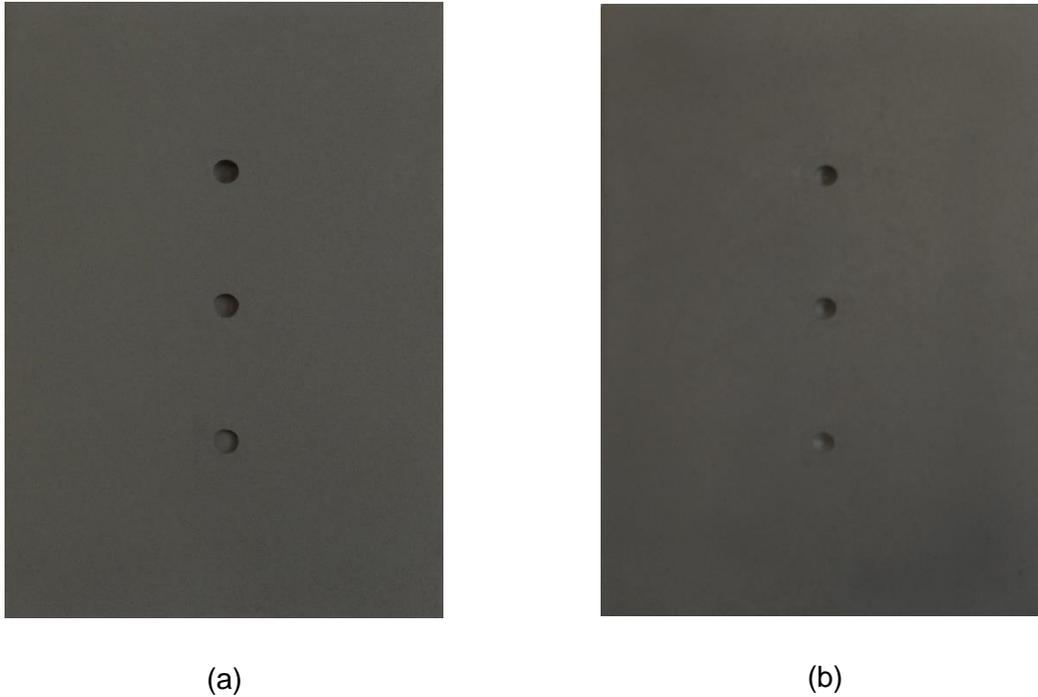


Figura 22: Placas de aço carbono do Lote 2 jateadas com microesferas de vidro com furos feitos com fresa (a) e com furadeira (b).

Tabela 6: Especificações dos corpos de prova do Lote 2.

Furo	P8C1 Furo Plano Com produto de corrosão		P8C2 Furo Plano Com produto de corrosão		C9S1 Furo Cônico Sem produto de corrosão	
	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)
1	5,65	3,43	5,43	3,42	4,89	3,41
2	5,56	2,54	5,60	2,45	4,98	2,56
3	5,53	1,47	5,58	1,51	4,64	1,42
Furo	C10C1 Furo Cônico Com produto de corrosão		C10C2 Furo Cônico Com produto de corrosão			
	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)		
1	4,89	3,51	4,96	3,52		
2	4,98	2,46	5,01	2,40		
3	4,64	1,37	4,67	1,45		

3.2.1. Revestimentos

Como já falado, no presente trabalho foram utilizados dois revestimentos, os quais são exemplos de revestimentos utilizados no interior de tanques de armazenamento de produtos petroquímicos. A aplicação foi feita com pincel através de uma fina camada, evitando a área dos furos. Essa camada serviu como adesivo para a fixação de uma película seca previamente preparada com o próprio revestimento. As películas foram feitas numa placa de teflon, aplicando os revestimentos com extensor. Depois de curados,

os revestimentos foram destacados manualmente e fixados no substrato metálico. A tabela 7 apresenta algumas características dos revestimentos utilizados. A figura 23 mostra os corpos de prova antes da aplicação da película final e após o completo revestimento.

Tabela 7: Revestimentos e suas respectivas características.

Tipo de Revestimento	Composição	Indicação de uso
Revestimento B	100% sólidos Resina epóxi modificada multifuncional com agente de cura modificado aminocicloalifático com reforços minerais modificados	Resistente a soluções alcalinas e alvejantes, acetona, bunker C, diesel, etanol, gasolina, álcool isopropílico, querosene, metanol, MEK, MIBK, nafta, água salgada, esgoto, tolueno, xileno, ac. acético (5%), ac. clorídrico (20-37%), ac. sulfúrico (10-20%), ac. nítrico (10-60%), ac. fosfórico (30-85%), ac. sulfúrico (30-98%)
Revestimento A	Sistema bicomponente de resinas epóxi multifuncionais aditivadas com escamas de vidro. Sólidos 98% Agente de cura: poliamida modificada	Resiste a uma larga gama de produtos químicos agressivos, incluindo solventes e ácidos fortes, à temperatura ambiente e também em temperaturas mais elevadas (até 80°C)



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 23: Corpo de prova com Revestimento A (a) aplicado em torno dos furos e (b) já revestido. Corpo de prova com Revestimento B (c) aplicado em torno dos furos e (d) já revestido.

3.3. Aparelhagem

Foram utilizadas duas técnicas de ultrassom, sendo elas ultrassom focalizado e ultrassom por ondas superficiais.

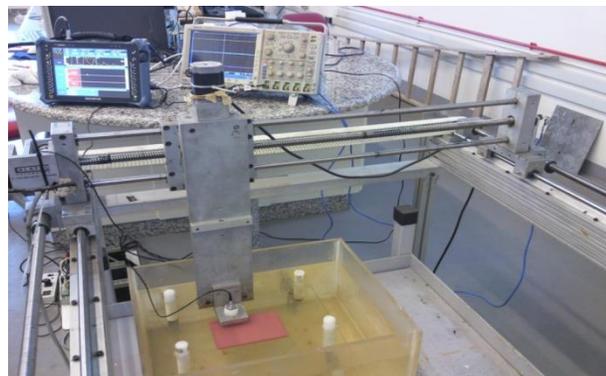
Para o ensaio com ultrassom focalizado foi utilizado um transdutor esfericamente focalizado da fabricante Imasonic, série 9730, de 5 MHz, o equipamento de ultrassom Olympus Omniscan MX2, mesa de varredura XYZ e um tanque para imersão das amostras em água, a qual funcionou como líquido acoplante. Equipamentos e aspectos da montagem experimental são mostrados na figura 24.



(a)



(b)



(c)

Figura 24: Aparato experimental: (a) Ultrassom Olympus Omniscan MX2 [19], (b) transdutor focalizado Imasonic, série 9730, de 5 MHz e (c) mesa de varredura XYZ com tanque de imersão abaixo.

Para o ensaio com ultrassom por ondas superficiais foi utilizado dois transdutores angulares da fabricante KRAUTKRÄMER, MWB 90-2, de 2 MHz, o equipamento de ultrassom Sonotron NDT Isonic 2005 e a mesa de varredura XYZ. A figura 25 ilustra o equipamento.



(a)



(b)

Figura 25: (a) Dois transdutores angulares da fabricante KRAUTKRÄMER, MWB 90-2, de 2 MHz e (b) equipamento Sonotron NDT Isonic 2005 [20].

3.4. Procedimento Experimental

O primeiro passo foi avaliar a velocidade sônica no material do revestimento. A velocidade foi medida numa amostra de 10 mm de espessura do revestimento A. As medidas foram retiradas em seis pontos distintos, três em uma face e três na face oposta. Foi utilizado o transdutor PANAMETRICS-NDT D7069 de frequência 2.25 MHz e o osciloscópio Agilent DS0X2002A recebendo o sinal do equipamento Sonotron NDT Isonic 2005. A frequência de 2.25 MHz foi a de melhor resultado, devido o material ser muito atenuante. A velocidade transversal estimada foi de 2000 m/s.

É muito comum numa inspeção ultrassônica não utilizar a velocidade encontrada antes da inspeção para obtenção dos resultados finais. Primeiramente, usa-se a velocidade encontrada como base para obtenção do melhor ajuste de tela, conseguindo visualizar somente o desejado do sinal obtido. Logo, usou-se a mesma velocidade para os dois revestimentos estudados para início da inspeção, com posterior ajuste se necessário.



(a)



(b)

Figura 26: (a) Amostra de Revestimento A e (b) Sinal obtido com as configurações utilizadas.

3.4.1. Ultrassom Focalizado

As inspeções foram realizadas pelo método Pulso-Eco, usando somente um transdutor emissor/receptor. Houve a necessidade da imersão dos corpos de prova em um tanque de água. Inspeções por contato direto já haviam sido descartadas, já que a zona morta e o campo próximo dos transdutores testados comprometeram as medições por quase toda a espessura dos corpos de prova. Além disso, transdutores esfericamente focalizados, como os utilizados neste projeto, possuem a concentração de energia sônica em um ponto focal pré-determinado. Assim, para garantir o correto posicionamento do ponto focal na profundidade de interesse, a inspeção por imersão se mostrou necessária.

Uma mesa de varredura XYZ foi utilizada. Seu sistema semiautomatizado teve o seu desenvolvimento em ambiente laboratorial anteriormente ao presente projeto. A mesa permite a movimentação do transdutor em três eixos e a coleta de dados de uma área pré-determinada por um equipamento de ultrassom acoplado ao transdutor utilizado, como visto no exemplo da figura 27.

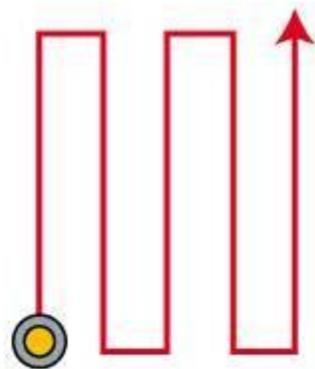


Figura 27: Desenho esquemático da movimentação do transdutor durante a varredura.

O posicionamento do ponto focal (identificado com D na figura 28) foi mantido na face oposta à face de acesso ao corpo de prova, como demonstrado na figura 28. Cada corpo de prova foi inspecionado duas vezes: uma posicionando o ponto focal na superfície oposta dos furos (Frente); e a outra com o ponto focal na superfície dos furos (Verso).

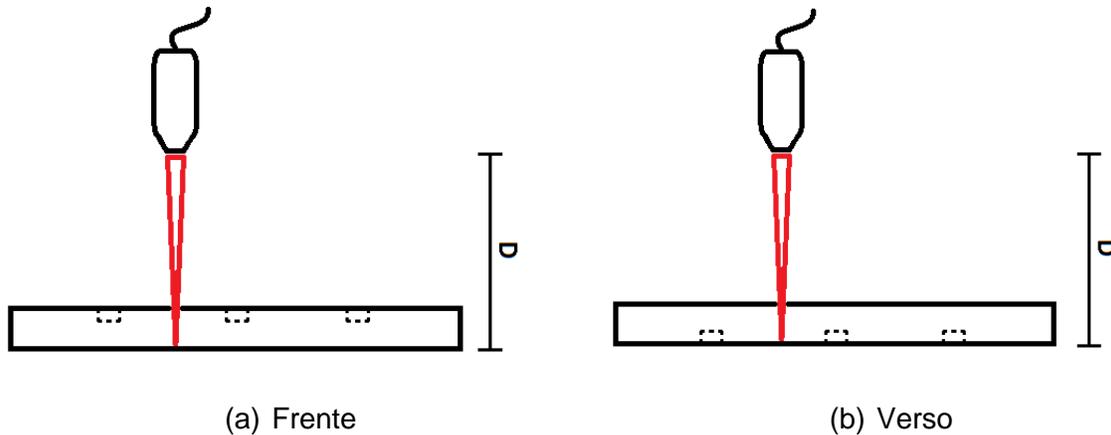


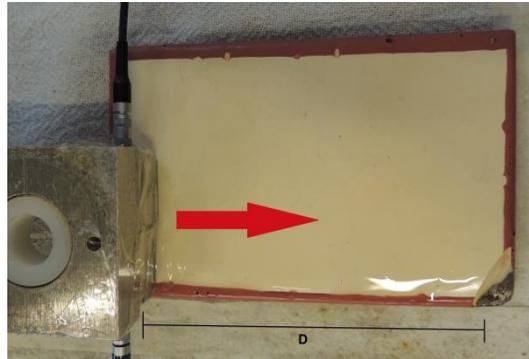
Figura 28: Demonstração do ponto focal do transdutor com relação aos corpos de prova.
 (a) Acesso pela frente do corpo de prova e (b) acesso pelo verso do corpo de prova.

A calibração antes dos ensaios foi realizada a partir de uma área não defeituosa dos próprios corpos de prova. Usando o sinal A-scan referente a essas áreas, elevou-se o segundo eco de fundo do material a 100% da tela. Logo, para a formação dos C-scans foram coletados os dados do segundo eco do A-scan em sua posição por toda a varredura. Para isso, foi criado um *gate* de aquisição no segundo eco e somente sua amplitude (em % na tela) era registrada, considerando também o tempo de voo do sinal. O equipamento de ultrassom e a mesa de varredura foram ajustados para uma resolução de um passo por milímetro, ou seja, um sinal A-scan era registrado a cada um milímetro de deslocamento do transdutor. O mapa C-scan era construído ao mesmo tempo e foi utilizado na avaliação dos resultados.

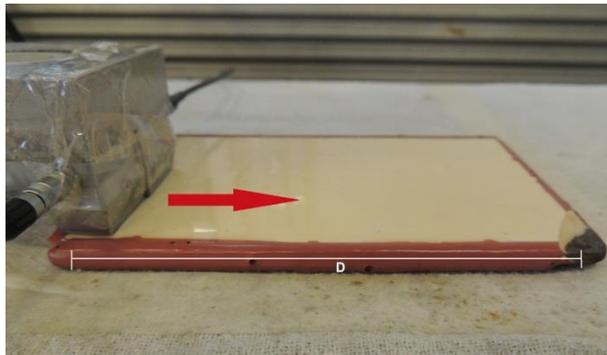
3.4.2. Ultrassom por Ondas Superficiais

As inspeções foram realizadas com o método *Pitch-Catch*, logo houve a necessidade do uso de dois transdutores no mesmo lado do corpo de prova para aquisição dos dados. A técnica por contato foi a utilizada e o acoplante foi o óleo. Nesse caso foi descartado o uso da técnica por imersão, pois, como visto ondas superficiais não existem em sólidos imersos em líquidos. Sendo assim, o óleo só formará uma pequena camada de acoplante para eliminar o possível ar que existiria entre os transdutores e o corpo de prova, o qual dificultaria a inspeção.

A calibração antes do ensaio foi realizada numa área não defeituosa dos corpos de prova, elevando o sinal do A-scan a 100% da tela. A mesma mesa de varredura XYZ foi utilizada, porém de forma diferente. A mesa auxiliou na coleta dos dados para formação de uma imagem B-scan. Os dados foram coletados através da varredura de toda a extensão (identificada como D na figura 29) do corpo de prova com uma velocidade constante. A seta na figura 29 indica o sentido de inspeção.



(a)



(b)

Figura 29: (a) Vista superior e (b) vista lateral do sentido de varredura dos primeiros 3 furos dos corpos de prova de seis furos.

O gráfico B-scan é formado por uma vista da seção transversal dos corpos de prova na reta de varredura. Como a localização dos furos é conhecida, a linha de varredura foi escolhida de forma a passar sobre os furos existentes. Logo, foi inspecionado cada três furos por vez nos corpos de prova com seis furos e no caso dos quais só possuíam três furos, somente a reta onde eles estariam. Somente a inspeção pela “Frente” foi testada. Inspeções pelo “Verso” foram descartadas, devido à técnica ultrassônica por ondas superficiais ser uma inspeção superficial e subsuperficial.

4. Resultados e Discussão

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados da inspeção com ultrassom focalizado e por ondas superficiais nas amostras com defeitos introduzidos propositalmente de maneira controlada. Primeiramente iremos falar das duas técnicas separadamente e depois de forma comparativa.

4.1. Ultrassom Focalizado

Sabendo que os corpos de prova possuem baixa espessura, frequências mais altas foram empregadas, no caso 5 MHz. Porém, os sinais de cada interface presente no interior do material não foram vistos por completo. Sinais provenientes de regiões não defeituosas só mostram o sinal da coluna d'água e múltiplas reflexões da superfície oposta do material, como pode ser visto no sinal A-scan da figura 30 (a). Sinais de regiões defeituosas possuem aspecto similar ao sinal A-scan da figura 30 (b). Observando os sinais provenientes das duas regiões distintas, é possível afirmar que regiões defeituosas possuem ecos de fundo atenuados e mais próximos.

Após visualizar e analisar diversos A-scans foi estabelecido que sinais com amplitude inferiores a 50% da tela são provenientes de regiões defeituosas, enquanto regiões que possuem amplitudes superiores a este valor são consideradas livres de defeitos.

Os mapas C-scan produzidos a partir dos A-scans mencionados acima e a escala de cores referente a amplitude do sinal de cada região inspecionada, estão apresentados nas figuras 31 até 42. Cores frias estão relacionadas a baixas amplitudes e cores quentes estão relacionadas a altas amplitudes.

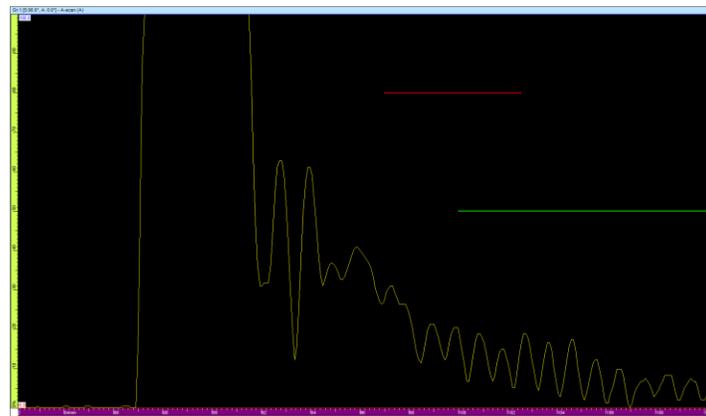
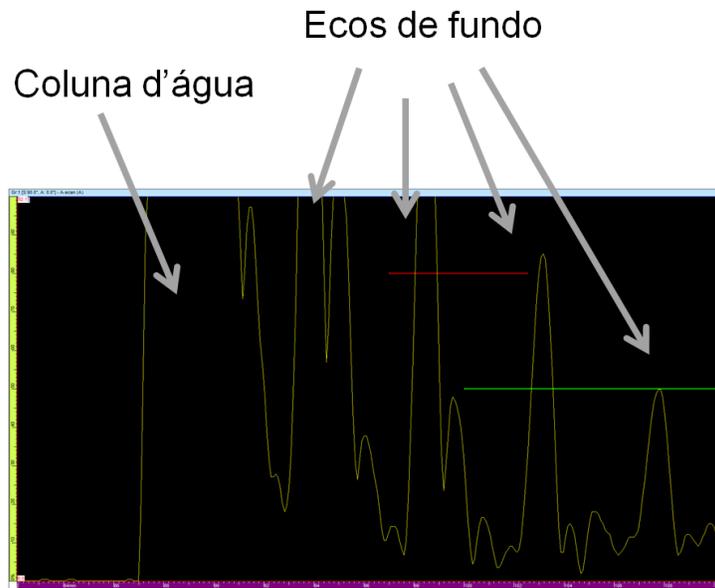
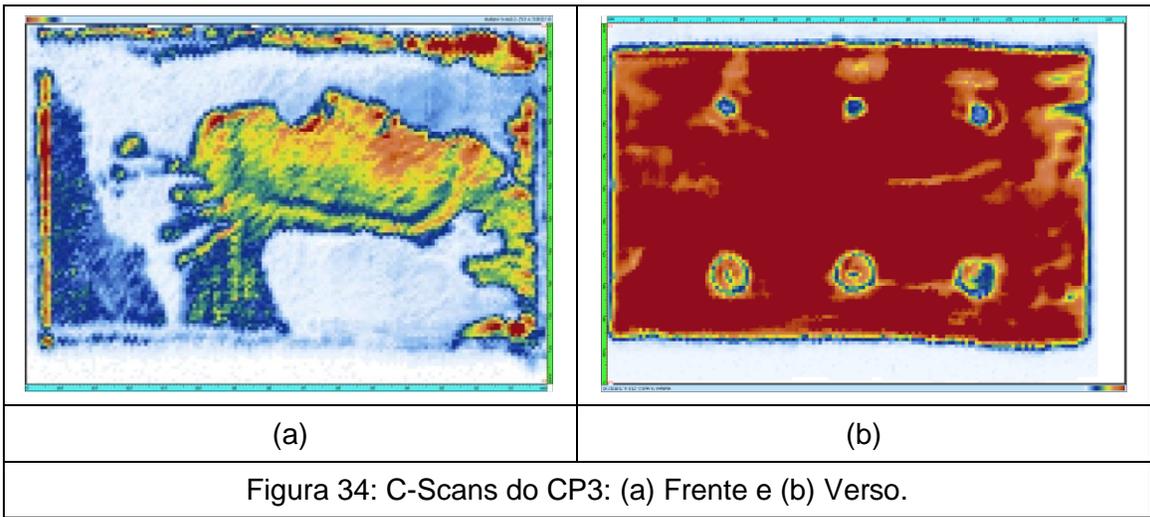
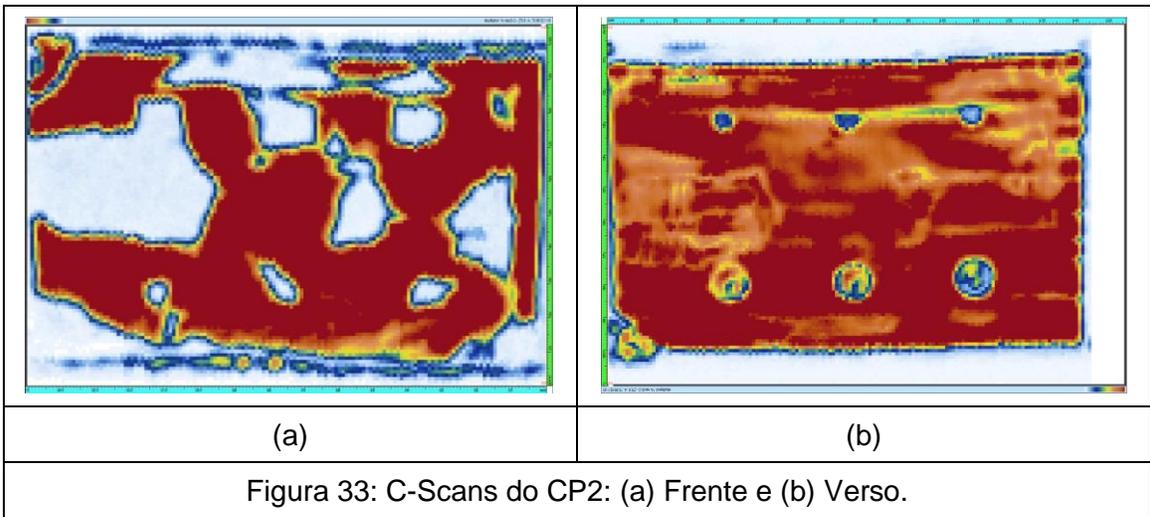
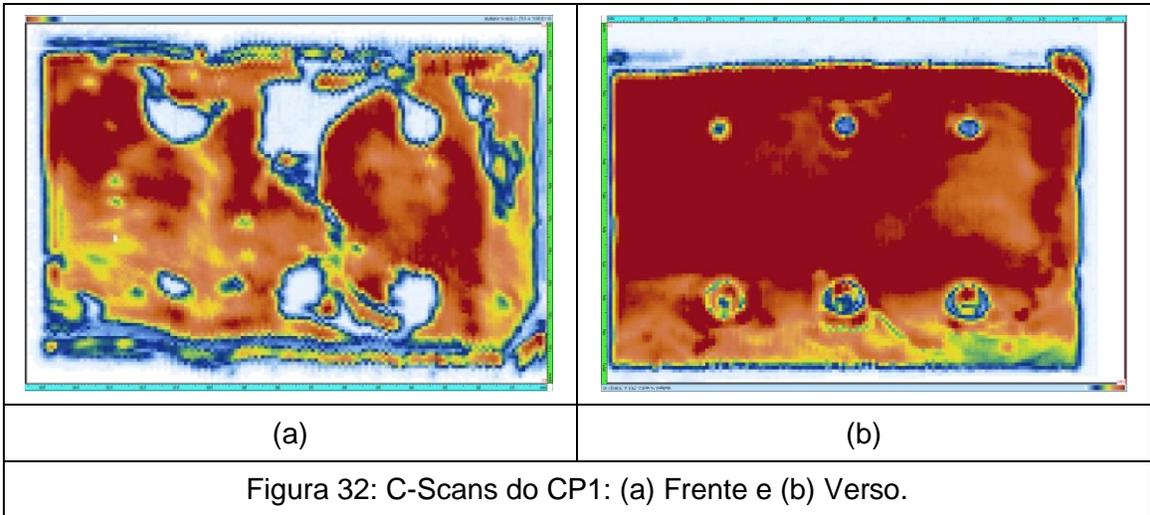
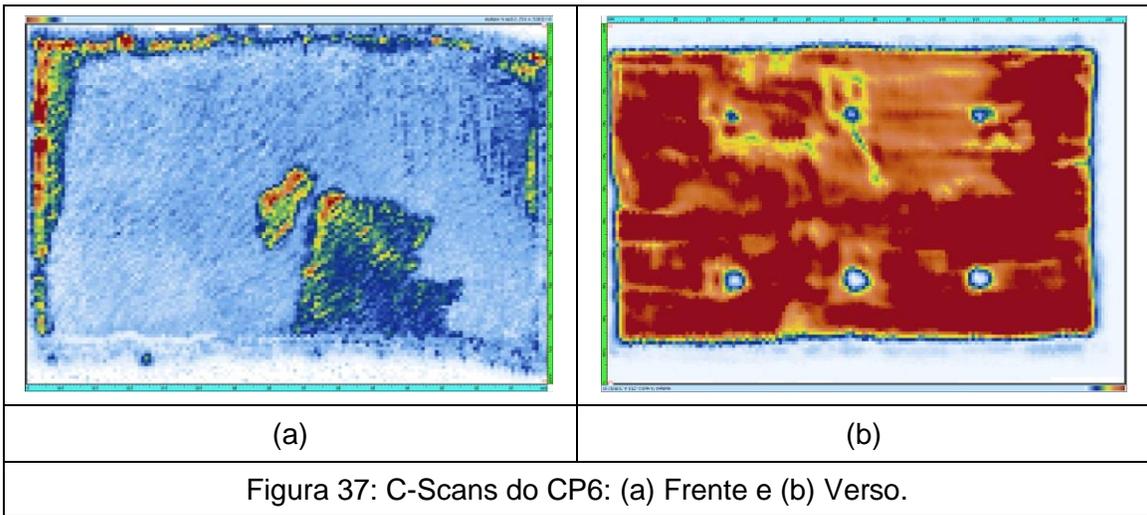
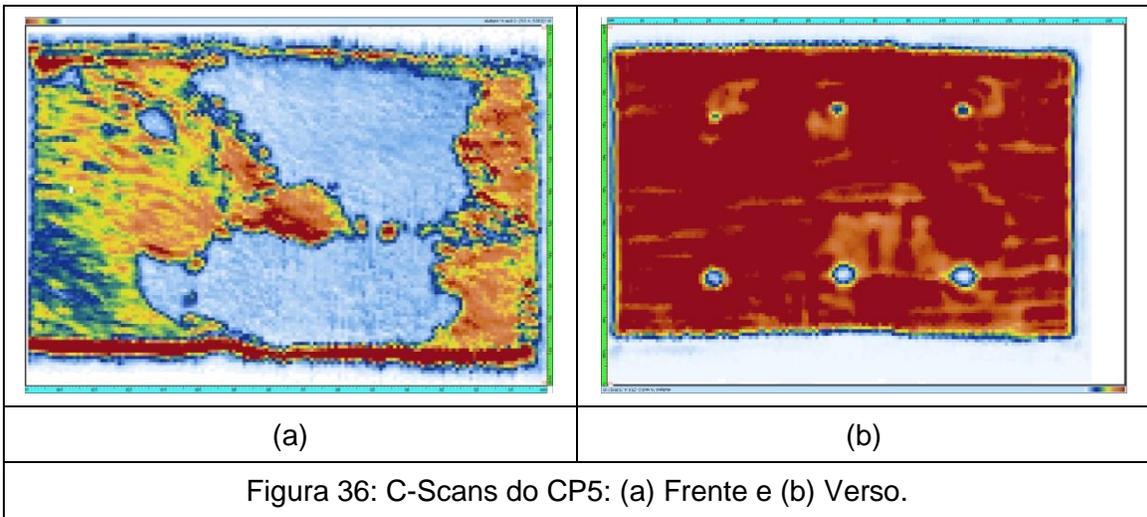
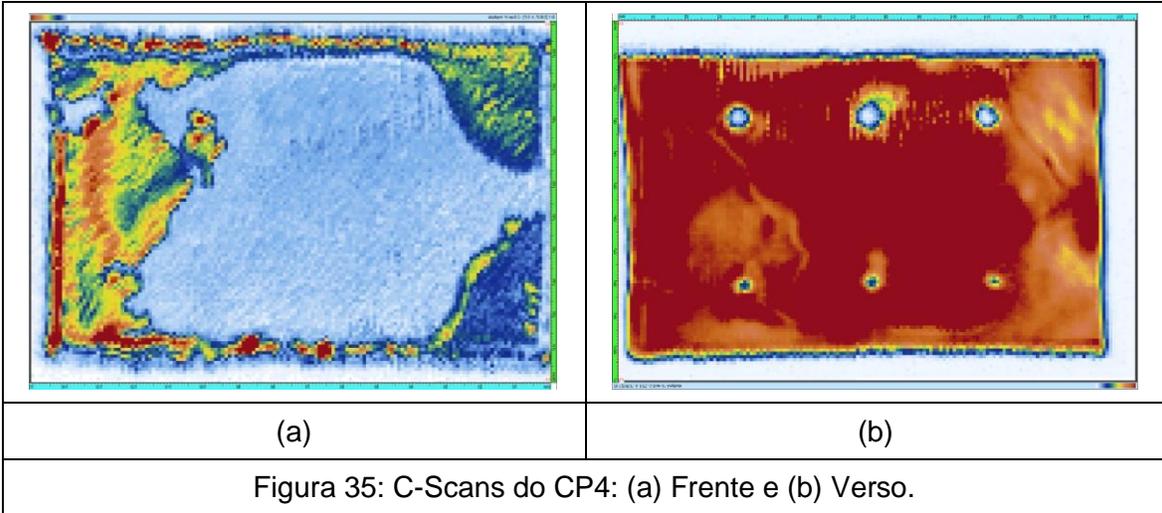


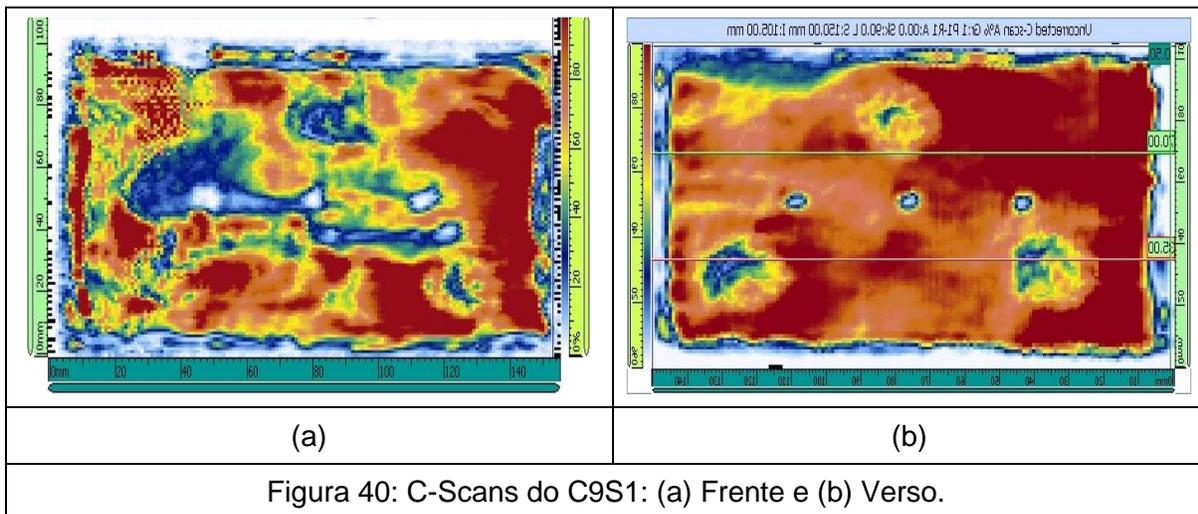
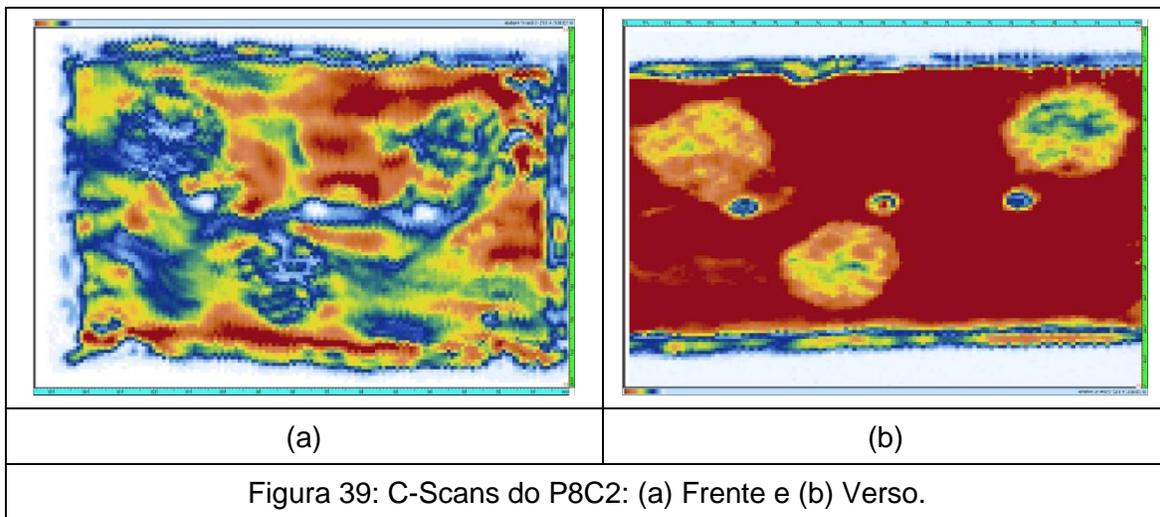
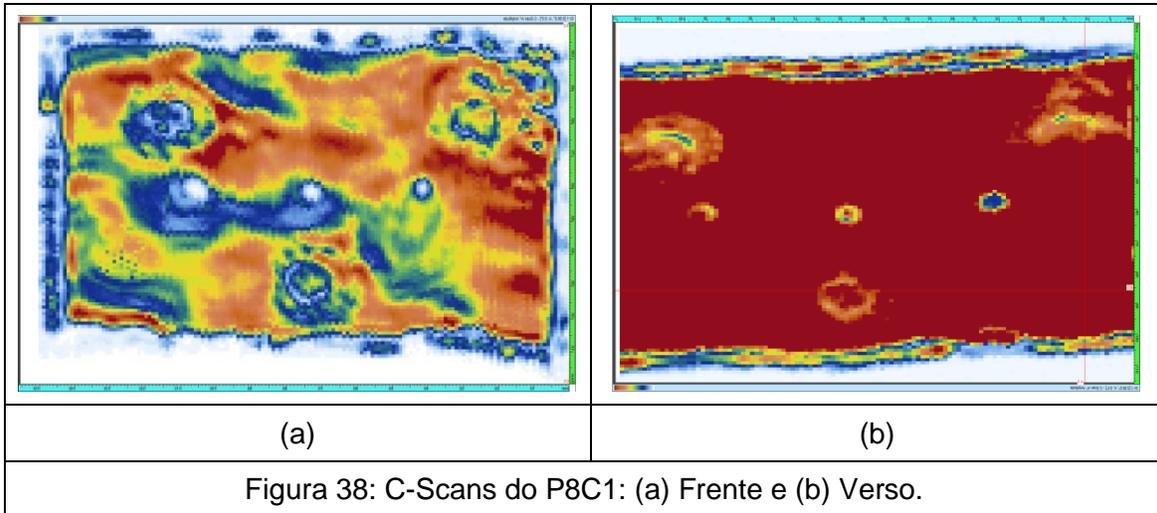
Figura 30: A-Scans de regiões (a) não defeituosas e (b) defeituosas.

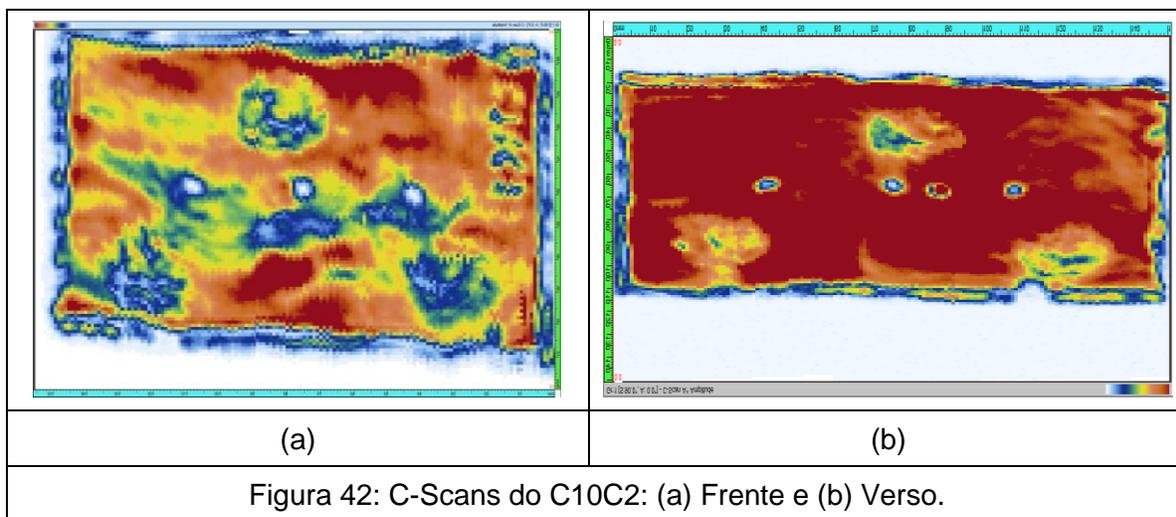
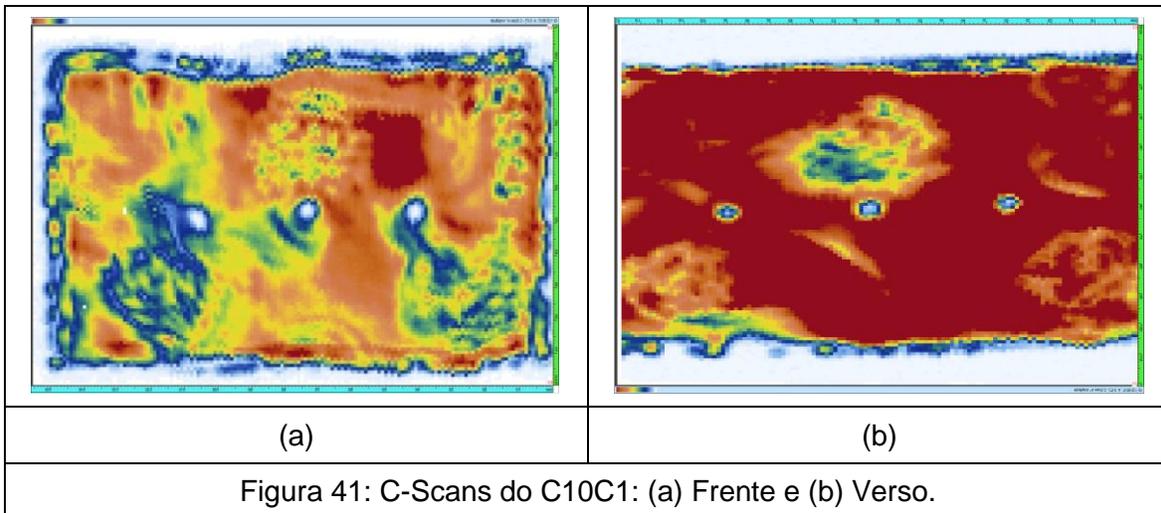


Figura 31: Legenda de cores para os mapas C-scan via ultrassom focalizado.









Analisando as figuras 32 até 42 é possível verificar que todos os defeitos simulados foram detectados com sucesso nas inspeções utilizando o transdutor focalizado. Principalmente durante a inspeção pelo “Verso” de todos os corpos de prova, onde as áreas defeituosas apresentam formato próximo ao circular e são representadas pelas cores azul e branca, indicando que os defeitos inseridos foram detectados de forma satisfatória.

As inspeções detectaram outras discontinuidades além das intencionalmente inseridas durante a fabricação destes corpos de prova. Em alguns casos, como na maioria das inspeções realizadas pela “Frente”, a presença de tais discontinuidades prejudicou a detecção dos defeitos inicialmente previstos. Além da presença de outras discontinuidades, a morfologia dos defeitos apontados pelo ultrassom não se aproxima

do aspecto circular esperado, indicando a possibilidade de alguma inadequação de processo durante a fabricação destes corpos de prova. No caso dos corpos de prova CP3 até o CP6 é possível observar que a inspeção pela “Frente” apontou presença de descontinuidade por quase toda a superfície do corpo de prova, impedindo a detecção de todos os defeitos intencionalmente inseridos.

Nas inspeções dos corpos de prova de três furos pela “Frente” é possível visualizar as três áreas defeituosas em formato circular e apresentando cor branca, diferente do que acontece nos corpos de prova de seis furos. A explicação para este fato seria a melhor aplicação do revestimento com o acabamento superficial melhorado. Mesmo assim, ainda é possível enxergar outras regiões que pelo critério de avaliação adotado seriam defeituosas. Destacam-se três áreas circulares grandes, as quais podem ser visualizadas em todos os corpos de prova de três furos, tanto na inspeção pela “Frente”, quanto pelo “Verso”, onde estão menos visíveis, porém ainda perceptíveis. Devido os corpos de prova terem sido aproveitados de estudos anteriores, essas áreas correspondem a estudos sobre ataque químico, o qual proporcionou uma pequena redução na espessura do aço.

A influência do acabamento superficial da camada de revestimento em comparação aos resultados obtidos é um fator importante a se considerar. Por se tratar de um material de grande atenuação, pequenas variações na espessura desta camada provocam grandes mudanças na resposta ultrassônica. Nos pontos em que o revestimento possui maior espessura, a amplitude do sinal ultrassônico decai em decorrência do poder de atenuação deste material. A inspeção pelo “Verso” não apresentou grande parte das áreas apontadas como defeituosas pela inspeção via “Frente”. Logo, é visto que as descontinuidades encontradas na inspeção pela “Frente” impedem a chegada do sinal ultrassônico à superfície posterior do corpo de prova e estão concentradas próximas à superfície em que os defeitos foram inseridos. Esse resultado é extremamente importante, pois mostra a potencialidade da técnica em detectar heterogeneidades no processo de aplicação de revestimentos compósitos.

4.1.1. Dimensionamento de defeitos

A partir das imagens C-scan obtidas na inspeção pelo “Verso” e de acordo com os critérios de aceitação adotados, foi realizado o dimensionamento dos defeitos previamente inseridos nestes corpos de prova. Os valores encontrados para cada furo serão apresentados a seguir de forma separada para melhor estudo e compreensão.

O software Tomoview V2.10 foi utilizado para o dimensionamento. Ele é uma interface do aparelho ultrassônico Olympus Omniscan MX2 e é possível analisar todos os dados obtidos no computador. A medida se restringiu a extensão apresentada pelo defeito nas imagens C-scan. Através da posição guardada pelos *encoders* de cada ponto na imagem, buscou-se o ponto em que a amplitude do eco decaiu a 50% do valor inicial, o que delimita o início e final do defeito. A comparação com a extensão real dos defeitos, medida antes da aplicação da camada de revestimento, foi realizada e o erro relativo foi calculado para cada defeito de cada corpo de prova.

4.1.1.1. Corpos de Prova com 6 furos

A tabela 8 apresenta o dimensionamento realizado para os defeitos dos corpos de prova de 6 furos. Os mesmos resultados estão apresentados na figura 43 para melhor clareza do resultado geral.

Tabela 8: Dimensionamento dos defeitos inseridos nos corpos de prova CP1, CP2, CP3, CP4, CP5 e CP6. Notar que o erro relativo está apresentado em módulo.

CP1	Defeito	Medido (mm)	Real (mm)	Erro Relativo
	1	3	5,45	45%
2	4,5	5,25	14%	
3	5	5,25	5%	
4	10,5	10,75	2%	
5	10,5	11	5%	
6	11	10,84	1%	

CP2	Defeito	Medido (mm)	Real (mm)	Erro Relativo
	1	5	5,41	8%
2	6	5,36	12%	
3	6	5,26	14%	
4	6	11,2	46%	
5	10	11,2	11%	
6	11	11,24	2%	

CP3	Defeito	Medido (mm)	Real (mm)	Erro Relativo
	1	5	5,15	3%
2	4,5	5,2	13%	
3	5,5	5,15	7%	
4	10	11,04	9%	
5	11	10,96	0%	
6	11	10,85	1%	

CP4	Defeito	Medido (mm)	Real (mm)	Erro Relativo
	1	2	3,45	42%
2	3	3,4	12%	
3	2	3,44	42%	
4	6	6,35	6%	
5	7	6,45	9%	
6	6	6,43	7%	

CP5	Defeito	Medido (mm)	Real (mm)	Erro Relativo
	1	1	3,33	70%
2	2,5	3,38	26%	
3	2	3,4	41%	
4	4,5	6,4	30%	
5	5,5	6,38	14%	
6	6,5	6,42	1%	

CP6	Defeito	Medido (mm)	Real (mm)	Erro Relativo
	1	3	3,44	13%
2	3,5	3,41	3%	
3	5	3,44	45%	
4	6	6,35	6%	
5	6,5	6,38	2%	
6	5,5	6,4	14%	

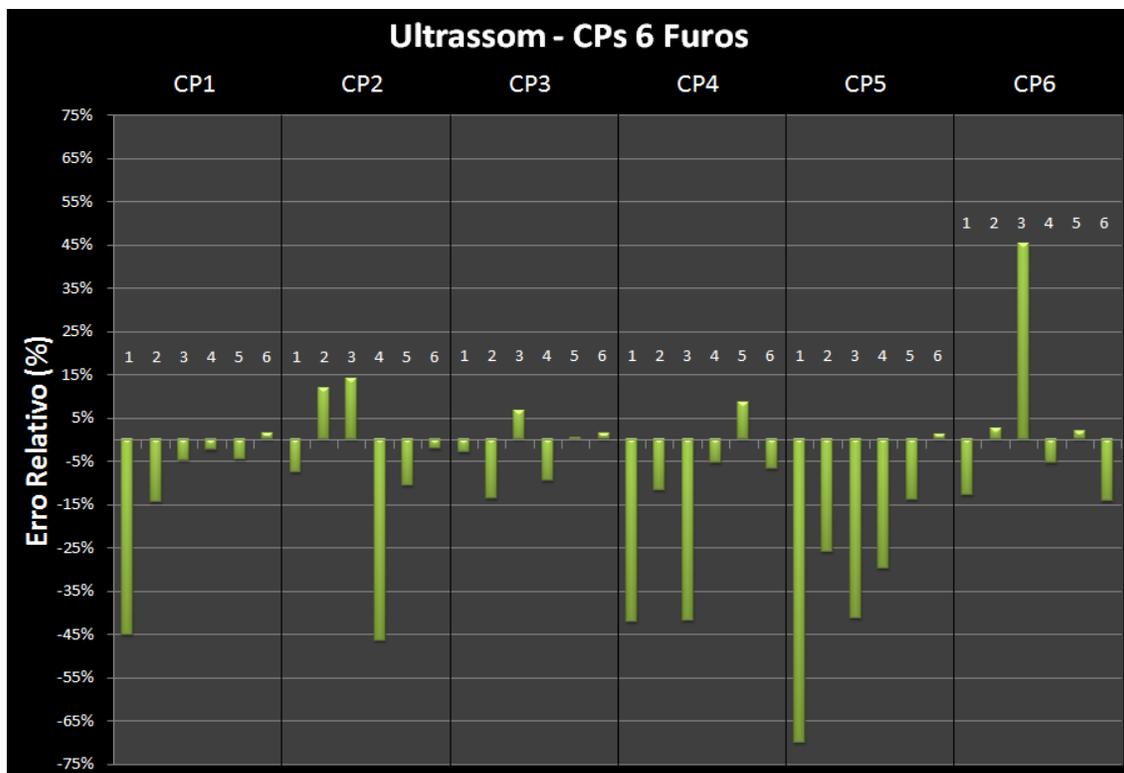


Figura 43: Erro relativo para cada defeito dos corpos de prova inspecionados

A partir dos dados apresentados na tabela 8 e figura 43 é possível visualizar que em aproximadamente 70% das medidas realizadas, houve um subdimensionamento dos defeitos detectados em comparação com seu tamanho real. Sendo este subdimensionamento mais evidente nos corpos de prova CP4 e CP5, cujos defeitos possuem menor extensão quando comparados com os demais.

Observando os valores obtidos, fica claro que os defeitos que apresentam pior comportamento frente ao dimensionamento de extensão foram os defeitos de menor diâmetro, ou seja, os defeitos 1 e 3 dos corpos de prova CP4, CP5 e CP6. O erro relativo médio encontrado por estes dois defeitos nos 3 corpos de prova citados é de 42% e 43%, respectivamente. Todos os demais defeitos apresentam erro relativo médio inferior a 20%.

Os valores de erro relativo encontrados para medição de cada furo em corpos de prova com mesmo tipo de furo e sem a presença de produto de corrosão apenas com diferença no tipo de revestimento utilizado, mostram que os resultados não foram conclusivos para alterações ou não na inspeção. Por exemplo, o CP1 e o CP2 que

apresentam furo plano e não possuem produto de corrosão, também o CP4 e o CP5 que possuem furo cônico e não têm produto de corrosão.

Os valores de erro relativo encontrados para medição de cada furo em corpos de prova com mesmo revestimento e mesma presença ou não de produto de corrosão apenas com diferença no tipo de furo, mostram que os resultados não foram conclusivos para alterações ou não na inspeção. Por exemplo, o CP1 e o CP4 que apresentam o revestimento A e não possuem produto de corrosão, também o CP3 e o CP6 que possuem revestimento B e produto de corrosão.

Os valores de erro relativo encontrados para medição de cada furo em corpos de prova com mesmo revestimento e mesmo tipo de furo apenas com ou sem produto de corrosão, mostram que os resultados não foram conclusivos para alterações ou não na inspeção. Por exemplo, o CP2 e o CP3 que apresentam o revestimento B e furo plano, também o CP5 e o CP6 que possuem revestimento B e furo cônico.

Considerando os defeitos de menor diâmetro (i.e. 3 mm e 5 mm), a incerteza no dimensionamento inerente ao sistema utilizado já pode ser considerado alto (33% e 20%, respectivamente), uma vez que a resolução empregada em todas as inspeções foi de 1 passo por milímetro. Dentre todos os defeitos inspecionados, apenas 8 dentre os 36 apresentam erro de dimensionamento superior a resolução da técnica, ou seja 22% dos casos. Desta forma, o ultrassom focalizado pode ser considerado uma técnica capaz de detectar e dimensionar satisfatoriamente os defeitos sob estudo.

4.1.1.2. Corpos de Prova com 3 furos

A tabela 9 apresenta o dimensionamento realizado para os defeito dos corpos de prova de 3 furos. Os mesmos resultados estão apresentados na figura 44 para melhor clareza do resultado geral.

Tabela 9: Dimensionamento dos defeitos inseridos nos corpos de prova contendo 3 furos.

Notar que o erro relativo está apresentado em módulo.

P8C1	Defeito	Medido (mm)	Real (mm)	Erro Relativo	P8C2	Defeito	Medido (mm)	Real (mm)	Erro Relativo
	1	5,5	5,65	3%		1	5	5,43	8%
	2	4,5	5,56	19%		2	3,5	5,6	38%
	3	5	5,53	10%		3	6	5,58	8%

C10C1	Defeito	Medido (mm)	Real (mm)	Erro Relativo	C10C2	Defeito	Medido (mm)	Real (mm)	Erro Relativo
	1	4	4,96	19%		1	4	4,92	19%
	2	4,5	5,01	10%		2	4,5	4,86	7%
	3	4	4,67	14%		3	3,5	4,96	29%

C9S1	Defeito	Medido (mm)	Real (mm)	Erro Relativo
	1	5	4,89	2%
	2	5,5	4,98	10%
	3	5,5	4,64	19%

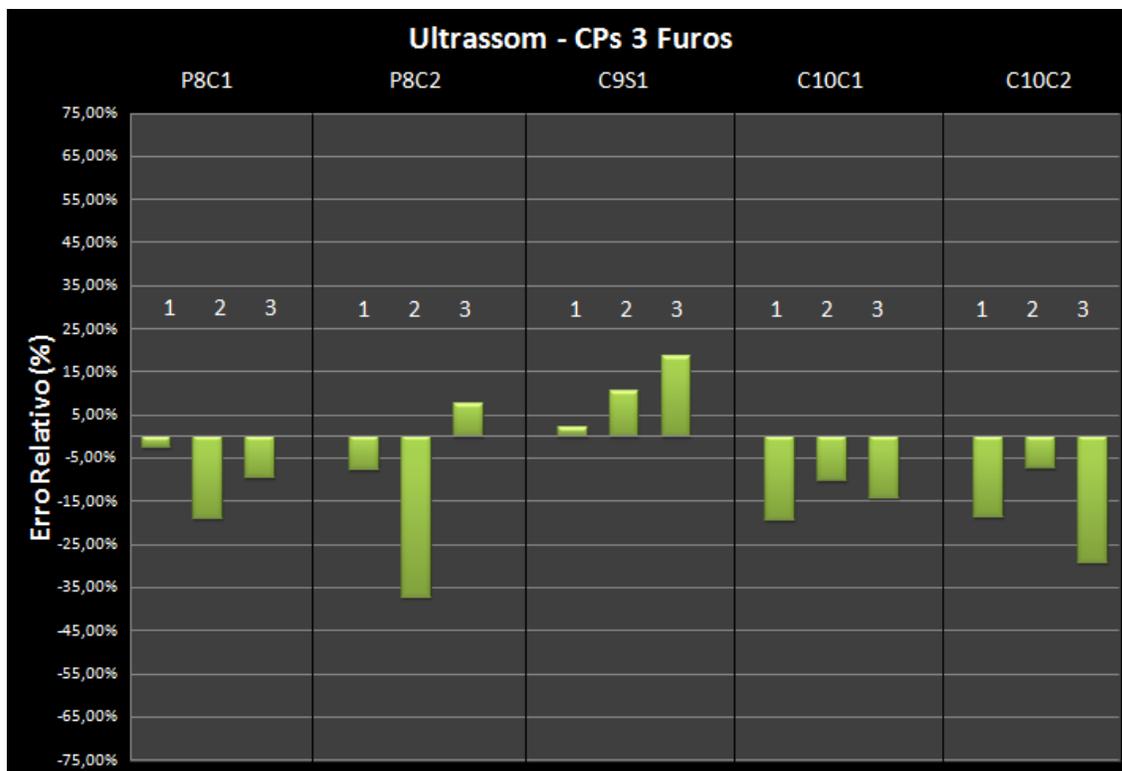


Figura 44: Erro relativo para cada defeito dos corpos de prova inspecionados

A partir dos dados apresentados na tabela 9 e figura 44 é possível observar que em aproximadamente 73% das medidas realizadas, o ultrassom apresentou um subdimensionamento dos defeitos detectados em comparação com seu tamanho real.

Os valores de erro relativo encontrados para medição de cada furo em corpos de prova com mesmo revestimento e mesma presença ou não de produto de corrosão apenas com diferença no tipo de furo, mostram que os resultados não foram conclusivos para alterações ou não na inspeção. Por exemplo, o P8C2 e o C10C1 que apresentam o revestimento A e produto de corrosão, também o P8C1 e o C10C2 que possuem revestimento A e produto de corrosão.

Os valores de erro relativo encontrados para medição de cada furo em corpos de prova com mesmo revestimento e mesmo tipo de furo apenas com ou sem produto de corrosão, mostram que os resultados não foram conclusivos para alterações ou não na inspeção. Por exemplo, o C9S1 e o C10C1 que apresentam o revestimento A e furo cônico.

Os corpos de prova neste caso possuem defeitos de extensão próxima a 5 mm, ou seja, a incerteza no dimensionamento inerente ao sistema neste caso é de aproximadamente 20%. Apenas 2 defeitos apresentaram erro de dimensionamento superior a este valor. Assim, seguindo a mesma lógica usada para os corpos de prova de 6 furos, o ultrassom focalizado pode ser considerado uma técnica capaz de detectar e dimensionar satisfatoriamente os defeitos sob estudo.

4.2. Ultrassom por Ondas Superficiais

Para o ensaio de ultrassom por ondas superficiais foram utilizados dois transdutores de 2 MHz cada. Porém, os sinais de cada interface presente no interior do material não foram vistos, principalmente por se tratar de um ensaio superficial e subsuperficial. Devido à onda emitida ficar na superfície ou próximo a ela, somente ensaios pela “Frente”, local onde estão os defeitos inseridos, são válidos e foram realizados.

Sinais provenientes de regiões não defeituosas só mostram um único sinal, o qual seria o sinal emitido pelo transdutor emissor e recebido pelo receptor sem interferências no seu trajeto, como pode ser visto no sinal A-scan da figura 45 (a). Já a região defeituosa possui seu sinal atenuado e possui aspecto similar ao sinal A-scan da figura 43 (b). Observando os sinais provenientes das duas regiões distintas, é possível afirmar que regiões defeituosas possuem seu sinal atenuado.

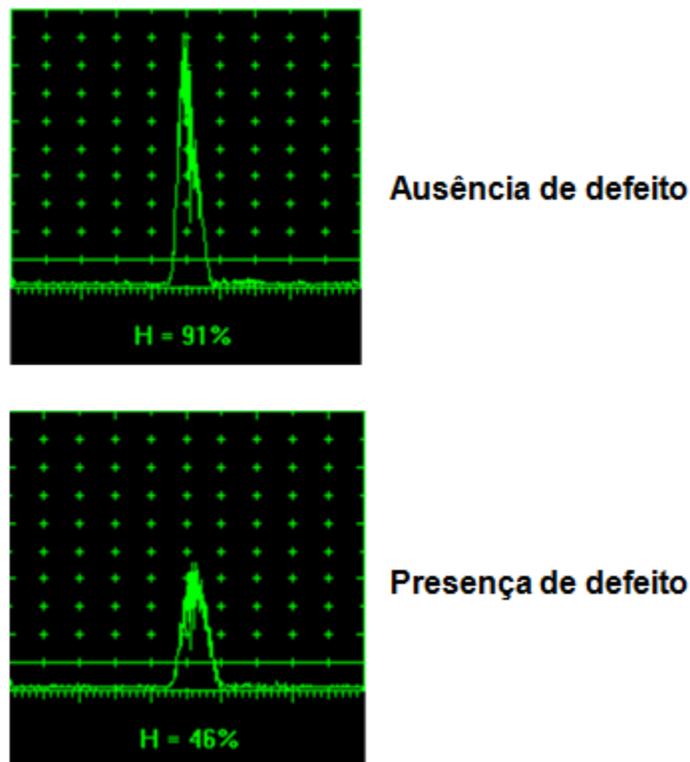


Figura 45: A-Scans de regiões não-defeituosas e defeituosas.

Após visualizar e analisar diversos A-scans como os da figura 45, foi estabelecido o mesmo critério já utilizado para o ultrassom focalizado: sinais com amplitude inferiores a 50% da tela são provenientes de regiões defeituosas, enquanto regiões que possuem amplitudes superiores a este valor são consideradas livres de defeitos.

Os mapas B-scan produzidos a partir dos A-scans mencionados acima e a escala de cores referente a amplitude do sinal de cada região inspecionada, estão apresentados nas figuras 46 à 57. Cores quentes estão relacionadas a baixas amplitudes e cores frias estão relacionadas a altas amplitudes.

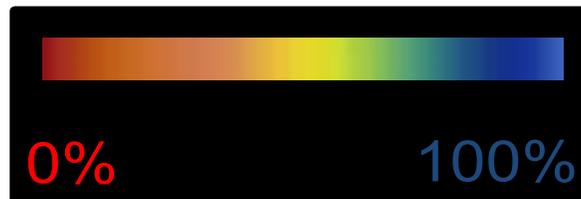
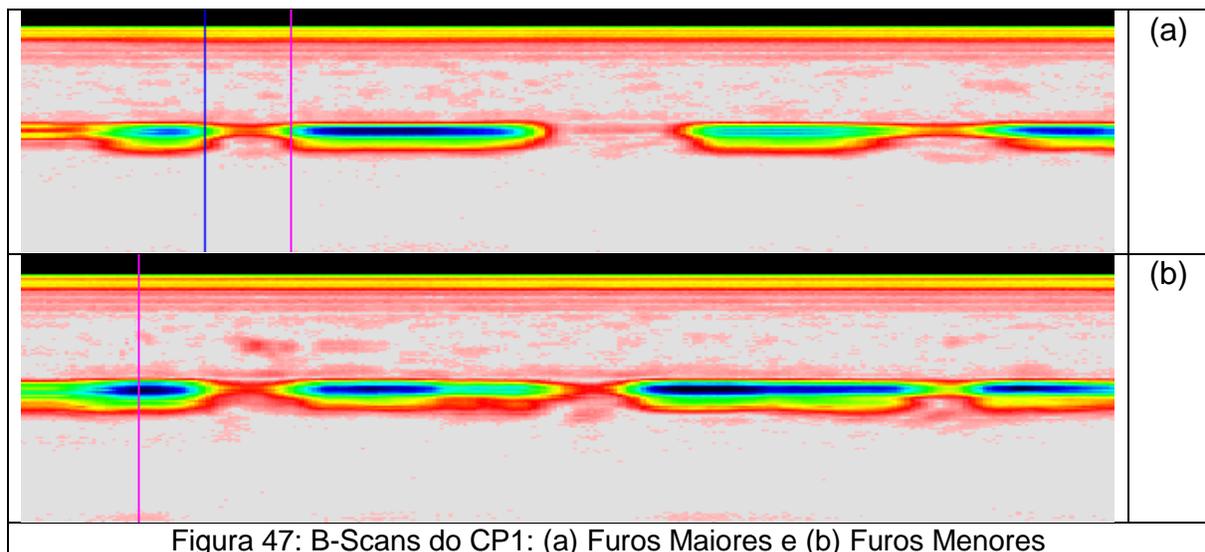
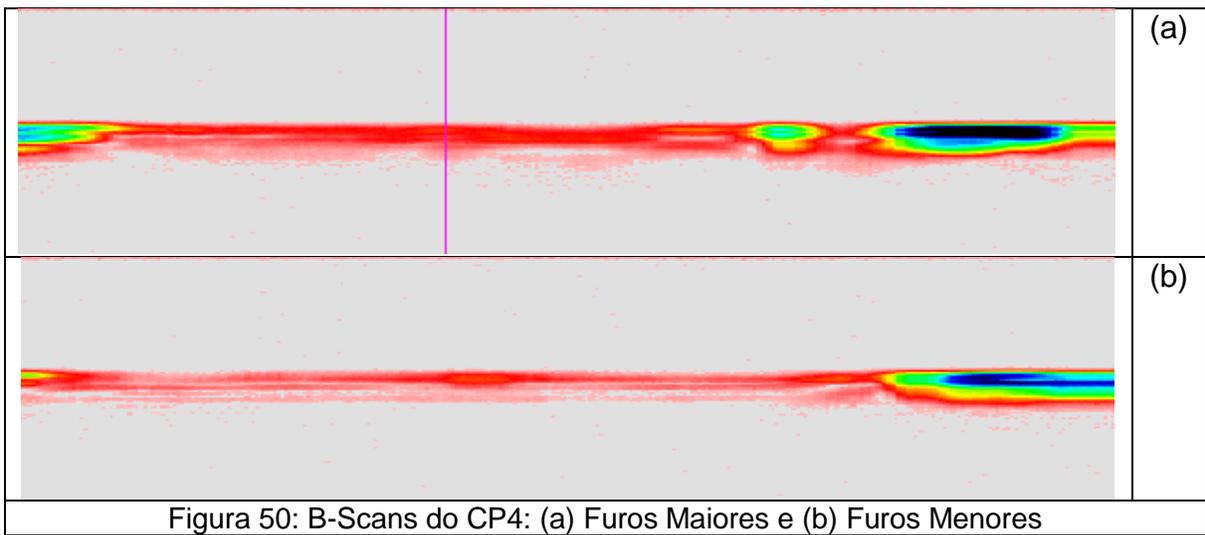
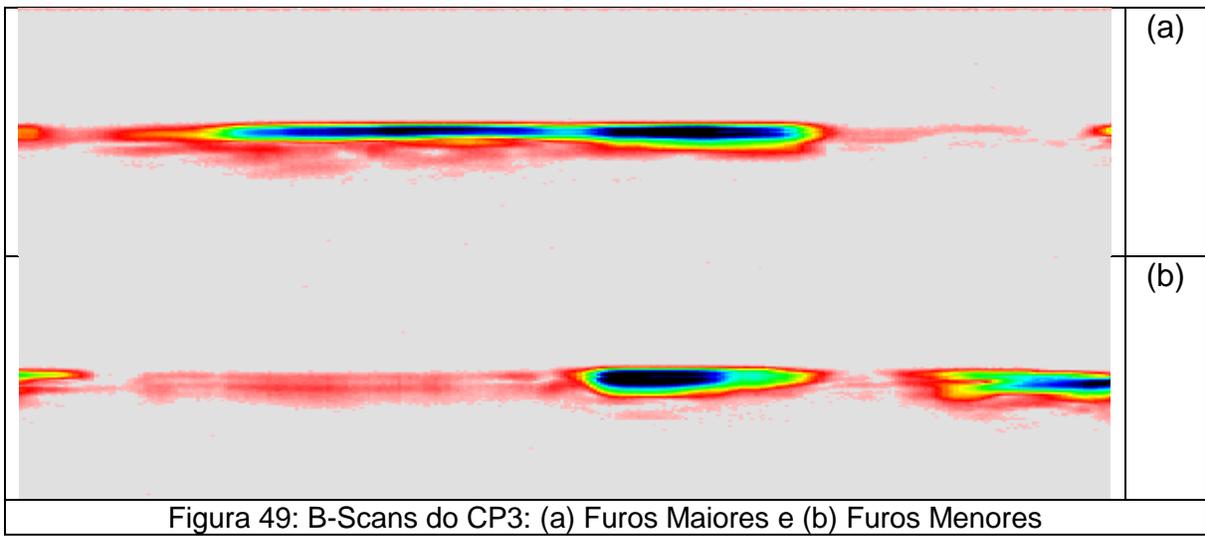
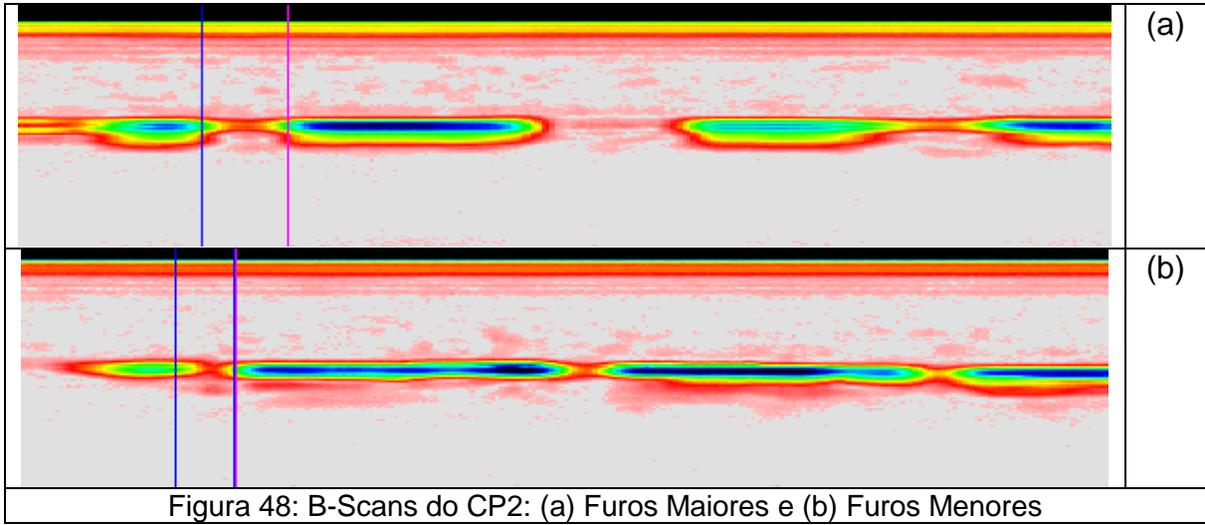
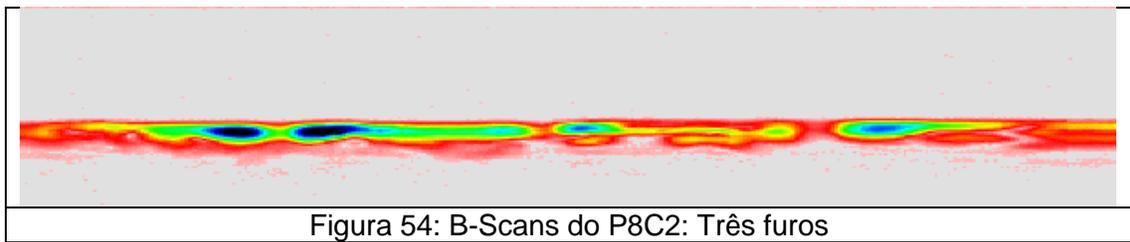
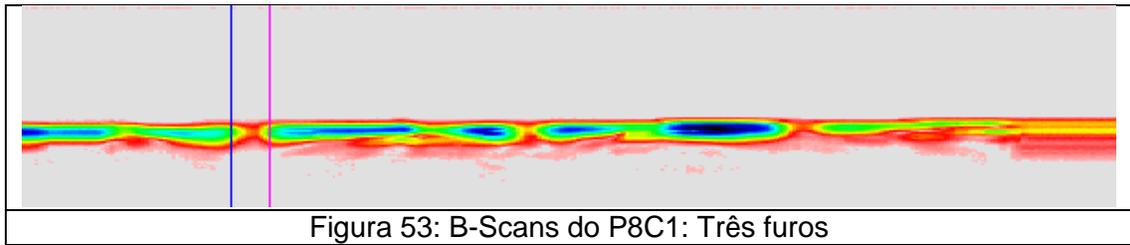
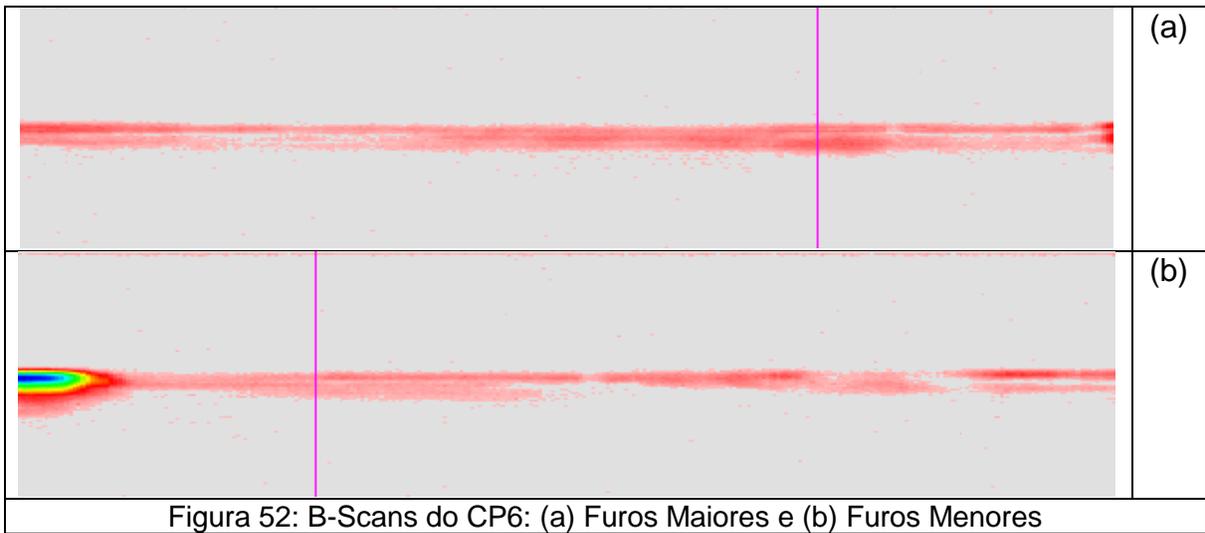
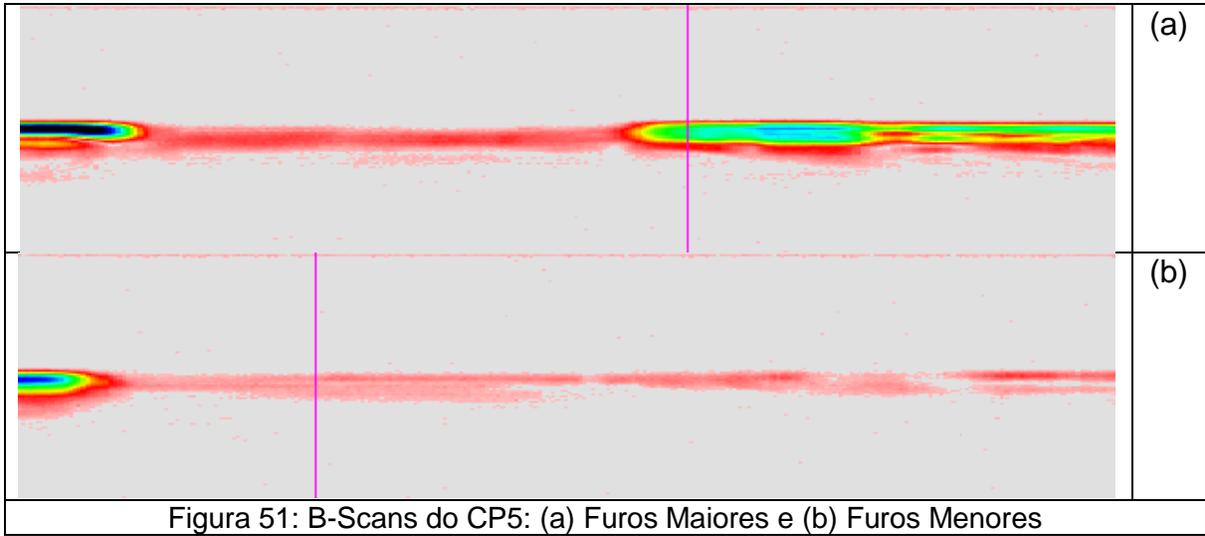
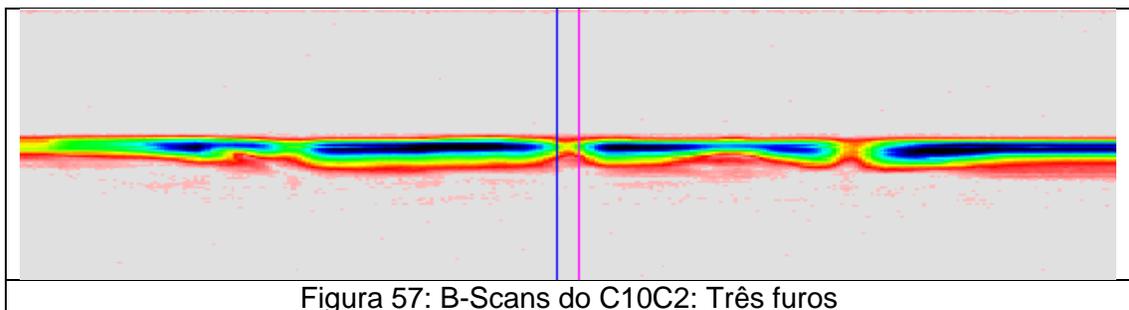
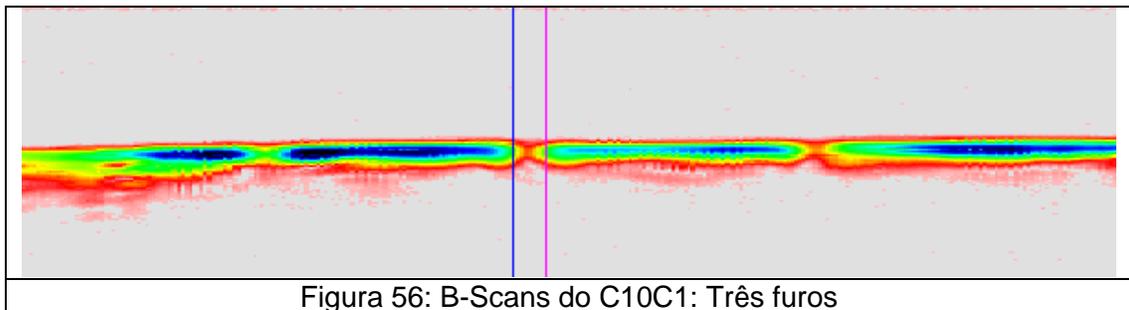
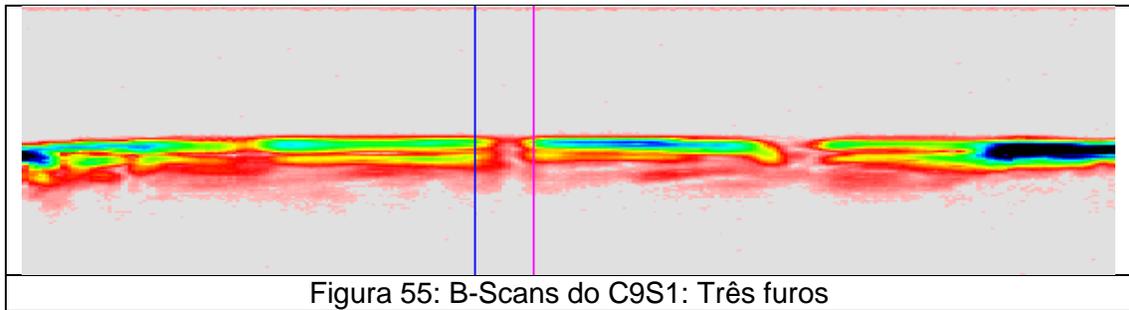


Figura 46: Legenda de cores para os mapas B-scan via ultrassom superficial.









As inspeções pela “Frente” detectaram em alguns corpos de prova regiões que possivelmente seriam os defeitos inseridos, pois já se sabe onde eles estão previamente. Nos corpos de prova de 6 furos CP1, CP2 e todos os corpos de prova de 3 furos é possível visualizar a localização dos defeitos inseridos. Mesmo assim há uma grande dificuldade de visualizar os defeitos inclusive nesses casos.

Heterogeneidades inerentes ao processo de preparação dos corpos de prova não são distinguidas pelo sinal em comparação aos defeitos. O fato foi prejudicial para a detecção dos defeitos inicialmente previstos. A extensão dos defeitos apontados pelo ultrassom superficial não está muito bem definida, mesmo nos casos onde é possível visualizá-las. No caso dos corpos de prova CP3 até o CP6 é possível observar que as inspeções apontaram a presença de heterogeneidades por quase toda a linha de

varredura empregada. A detecção de quase todos os defeitos intencionalmente inseridos foi prejudicada.

4.2.1. Dimensionamento de defeitos

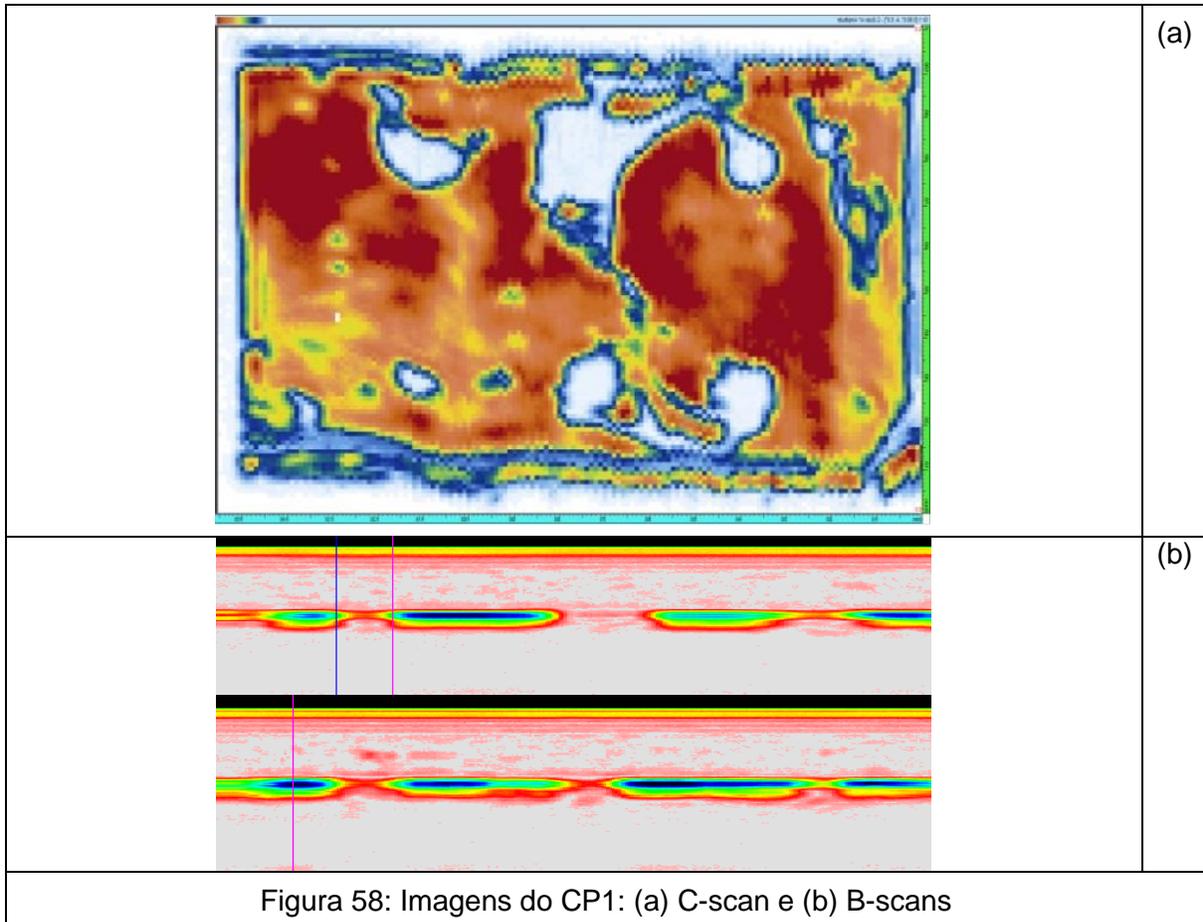
As imagens B-scan não foram capazes de fornecer valores confiáveis durante o dimensionamento dos defeitos com erros relativos baixos. Portanto, não será exposto nenhum gráfico nem tabela sobre as tentativas de dimensionamento realizadas.

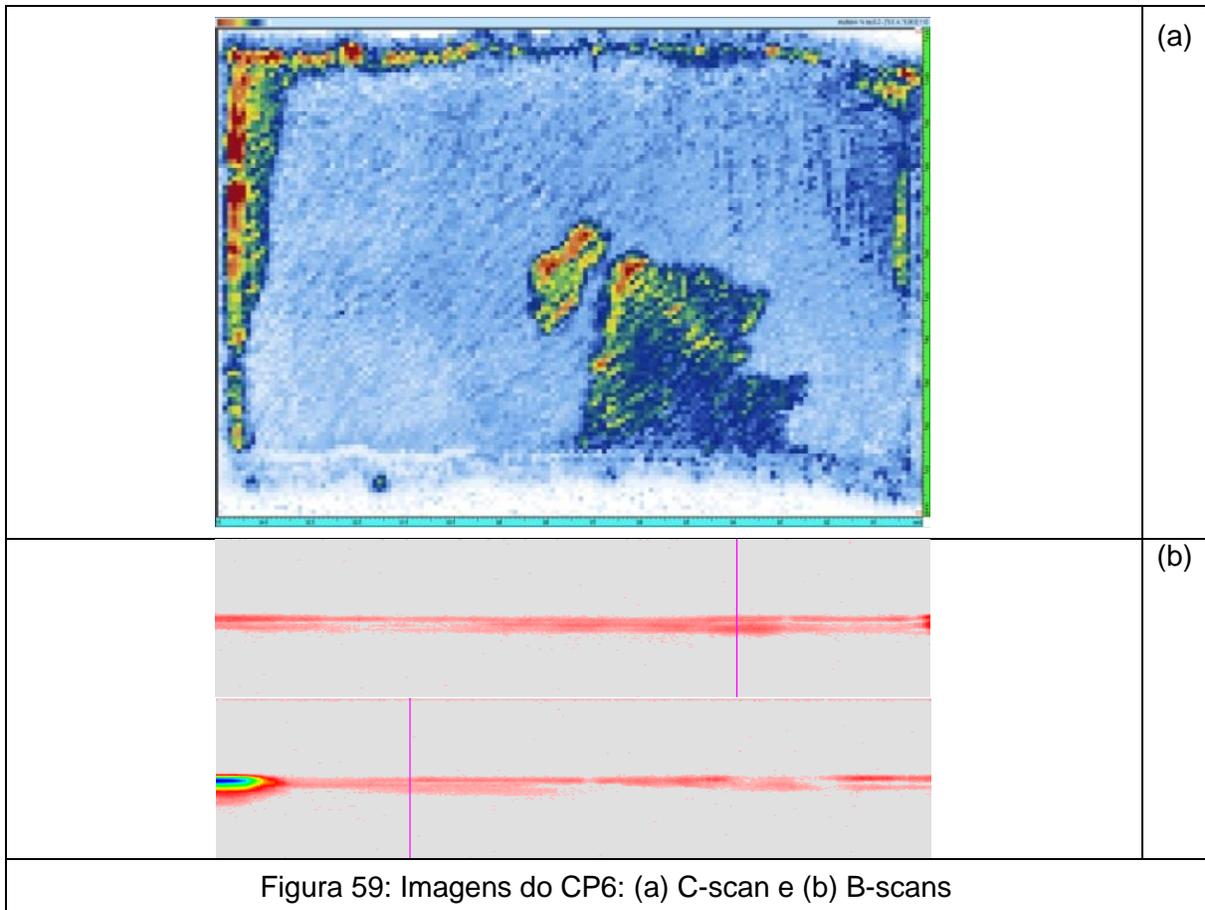
Primeiramente, o dimensionamento não será exposto devido à presença de defeitos além dos inseridos propositalmente. A visualização dos defeitos inseridos com clareza e precisão tornou-se impossível, logo seu dimensionamento também.

Outro motivo seria a forma como as inspeções foram realizadas para a obtenção das imagens B-scan. A varredura de toda a extensão do corpo de prova com uma velocidade constante só é possível em três furos por vez, como explicado anteriormente. Porém, o grande problema está na morfologia dos defeitos. Eles sendo circulares não é possível afirmar com certeza se a reta utilizada para a obtenção das imagens B-scan passa pelo centro da circunferência dos defeitos. Logo, mesmo hipoteticamente obtendo imagens limpas de defeitos não previstos, não há a certeza se a linha de varredura está localizada no eixo da circunferência ou por qualquer outro ponto da mesma.

4.3. Comparação entre as técnicas utilizadas

As técnicas utilizadas acabaram enfrentando os mesmos problemas na obtenção das imagens C-scan e B-scan nas inspeções pela “Frente”, as únicas que podem ser comparadas, pois o ultrassom por ondas superficiais só foi utilizado deste modo. As comparações das imagens do CP1 e do CP6 são expostas nas figuras 58 e 59, respectivamente.





Tanto o ultrassom focalizado, quanto o ultrassom por ondas superficiais detectaram as mesmas descontinuidades não previstas durante a inspeção pela “Frente”. A presença de tais descontinuidades prejudicou o resultado dos ensaios. Comparando as imagens obtidas é possível afirmar que realmente existem descontinuidades não previstas criadas pelo pobre acabamento superficial realizado durante a aplicação do revestimento na superfície onde os defeitos controlados foram feitos.

5. Conclusão

A busca por técnicas capazes de detectar defeitos abaixo da camada de revestimento anticorrosivo é de grande importância, uma vez que por inspeção visual não seria possível a visualização dos mesmos. Para o presente projeto, foram escolhidas as técnicas de ultrassom focalizado e ultrassom por ondas superficiais para avaliação deste tipo de defeito.

O ensaio por ultrassom por ondas superficiais não mostrou resultados satisfatórios, podendo visualizar somente alguns defeitos, não todos e mesmo assim não foi possível dimensioná-los com precisão. A rugosidade do revestimento na face onde foram feitos os defeitos controlados atrapalhou muito o ensaio. A técnica também não pode ser testada na face oposta por ser uma técnica superficial, não alcançando os defeitos se estivessem do outro lado do corpo de prova. Mesmo se tivesse um acabamento perfeito da superfície, os defeitos não poderiam ser dimensionados com precisão pela forma como foi obtida a imagens B-scan e a morfologia circular dos defeitos.

A utilização do ultrassom focalizado mostrou ser uma alternativa viável na detecção dos defeitos controlados, apesar de apresentar o mesmo problema com a rugosidade observada com o ultrassom por ondas superficiais nas inspeções pela “Frente”. Ainda houve alternativa para esta técnica, as inspeções pelo “Verso” foram realizadas. Todos os defeitos inseridos foram detectados com sucesso e dimensionados, sem interferência da rugosidade das amostras. Produto de corrosão, tipo de revestimento e tipo de furo não obtiveram resultados conclusivos para interferência ou não na inspeção. É possível afirmar que o erro apresentado pela técnica de ultrassom é aceitável considerando que as incertezas de dimensionamento do sistema podem ser consideradas altas para os defeitos de menor diâmetro.

Por fim, a técnica que mostrou ser a melhor para detecção de defeitos em revestimentos orgânicos é o ultrassom focalizado, com a qual foi possível detectar e dimensionar satisfatoriamente os defeitos sob estudo. Sua grande viabilidade para uso se deve em grande parte pela capacidade de inspecionar pelo lado oposto a superfície com possíveis problemas. Portanto, torna viável a inspeção sem a parada do equipamento inspecionado.

6. Trabalhos Futuros

Para aprimoramento das técnicas estudadas nesse projeto e uma melhor inspeção, algumas sugestões podem ser feitas:

- Obter imagens C-scan com ultrassom por ondas superficiais, permitindo a medição dos defeitos encontrados de forma mais confiável.

- Fabricação de novos corpos de prova com revestimentos de melhor acabamento superficial na face onde se encontram os defeitos controlados.

- Testar se é possível a utilização da técnica de Ondas Guiadas para analisar os mesmos defeitos controlados nos corpos de prova desse projeto.

7. Referências

1. ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultrassom**. ABENDI, ed. Julho, 2011.
2. SANTIN, J. L. **Ultra-som: Técnica e Aplicação**. PETROBRAS.
3. GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6.ed. Rio de Janeiro, LTC, 2011.
4. NESVIJSKI, E. G. **Some Aspects of Ultrasonic Testing of Composites**. Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2000.
5. ASM Handbook. **Nondestructive Evaluation and Quality Control**. v. 17. 1989.
6. VIKTOROV, I. A., 1967. **Rayleigh and Lamb Waves. Physical Theory and applications**. New York: Plenum Press, pp. 46-56.
7. GUSEV, V., DESMET, C., LAUIKS, W., GLORIEUX, C., THOEN, J., 1996. **Journal of the Acoustical Society of America**. pp 1514-1528.
8. LAKESTANI, Fereydoun, COSTE, Jean-François and DENIS, René, 1995. **Application of Ultrasonic Rayleigh Waves to Thickness Measurement of Metallic Coatings**. Elsevier. v. 28, No. 3, pp. 171-178.
9. NDT Resource Center. **Introduction to Ultrasonic Testing**. Disponível em: <www.ndt-ed.org>. Acesso em: 11 abril 2014.
10. **Non Destructive Testing Handbook**. 3rd ed. Columbus: American Society of Non Destructive Testing, v. 7, 2007.
11. HIRSEKORN, S., 2001. **Nonlinear transfer of ultrasound by adhesive joints – a theoretical description**. Ultrasonics, v. 39, p. 57-68.
12. D'ORAZIO, T., LEO, M., DISTANTE, A., GUARAGNELLA, C., PIANESE, V. and CAVACCINI, G. 2006. **Automatic Ultrasonic Inspector for Internal Defect Detection in Composite Materials**. Elsevier. v. 41, p. 145-154.
13. VEIGA, J. L. B. C., CARVALHO, A. A., SILVA, I. C., REBELLO, J. M. A., 2003. **Automação da Análise do Ensaio Ultra-Sônico Pulso-Eco**. Rio de Janeiro.

14. SIQUEIRA, M. H. S., 2002. ***Inspeções em Grandes Distâncias Utilizando ondas ultra-sônicas guiadas e inteligência artificial.*** Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Engenharia de Metalúrgica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
15. KRAUTKRÄMER, J., KRAUTKRÄMER, H. ***Ultrasonic Testing of Materials.*** 3rd ed. Springer-Verlag, 1983.
16. ASM Handbook. ***Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection.*** 2003. Vol. 13A.
17. VERMON, W. H. J., 1957, ***Metallic Corrosion and Conservation of Natural Resources.*** Institution of Engineers. Londres, s/n. pp. 105-133.
18. SILVA, B. P., ***Avaliação de Falhas em Revestimentos Anticorrosivos pelo Método de Ensaio Não-Destrutivo por Ultrassom.*** Projeto de Graduação. Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
19. <http://calibraend.blogspot.com.br/2013_02_01_archive.html> Acesso em: 19 maio 2014.
20. <<http://www.ndt-td.ru/katalog/ultrazvukovoy-kontrol/defektoskopi-s-ultrazvukovimi-fazirovannimi-reshetkami/ultrazvukovoy-defektoskop-olympus-omniscan-mx2.html>> Acesso em: 19 maio 2014.