

AVALIAÇÃO DE FALHAS EM REVESTIMENTOS ANTICORROSIVOS PELO MÉTODO DE ENSAIO NÃO- DESTRUTIVO POR ULTRA-SOM.

Bruno Pacheco da Silva

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.

Orientadores: Isabel Cristina Pereira
Margarit-Mattos

João Marcos Alcoforado Rebello

Rio de Janeiro
SETEMBRO/2011

AVALIAÇÃO DE FALHAS EM REVESTIMENTOS ANTICORROSIVOS PELO MÉTODO
DE ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO POR ULTRA-SOM.

Bruno Pacheco da Silva

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. Isabel Cristina Pereira Margarit-Mattos, D. Sc.
PEMM-COPPE/UFRJ - (Orientadora)

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, Dr.
PEMM-COPPE/UFRJ - (Co-Orientador)

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

Prof. Luiz Carlos Pereira, D. Sc.
PEMM-COPPE/UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO de 2011

Silva, Bruno Pacheco

Avaliação de Falhas em Revestimentos Anticorrosivos pelo Método de Ensaio Não-Destrutivo por Ultra-Som/ Bruno Pacheco da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2011.

IX, 85 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Isabel Cristina Pereira Margarit-Mattos

Co-Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Projeto de graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica, 2011.

Referências Bibliográficas: p.81-82.

1. Ultra-Som 2. Revestimentos Orgânicos 3. Ensaios não-destrutivos 4. Phased Array
- I. Margarit-Mattos, Isabel Cristina Pereira *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Metalúrgica III. Avaliação de Falhas em Revestimentos Anticorrosivos pelo Método de Ensaio Não-Destrutivo por Ultra-Som.

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

AVALIAÇÃO DE FALHAS EM REVESTIMENTOS ANTICORROSIVOS PELO MÉTODO DE ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO POR ULTRA-SOM

Bruno Pacheco da Silva

Setembro/2011

Orientadora: Isabel Cristina Pereira Margarit-Mattos

Co-Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Curso: Engenharia Metalúrgica

O presente trabalho avalia o desempenho do Ensaio por Ultra-Som na detecção de defeitos em revestimentos orgânicos anticorrosivos. As falhas mais frequentes são: falhas de aderência, empolamento, corrosão aparente ou sob a película de pintura, deterioração do revestimento e falhas de aplicação, por exemplo, vazios/bolhas entre camadas ou na interface entre o revestimento e o substrato metálico. Esse projeto está dividido em quatro partes, a saber: i) fundamentação teórica e revisão bibliográfica sobre o emprego de ultrassom na avaliação de revestimentos anticorrosivos; ii) posicionamento do problema com um estudo de caso abordando a dificuldade na detecção de falhas em revestimentos considerados de alto desempenho pela indústria do petróleo; iii) trabalho experimental envolvendo a preparação de amostras com defeitos introduzidos propositalmente, com dimensões e localização conhecidas. Essas amostras serão avaliadas pela técnica de ultrassom utilizando transdutores com diferentes frequências e phased array; iv) os resultados obtidos na etapa anterior permitirão um estudo tecnológico sobre os procedimentos mais adequados para a detecção de cada tipo de falha. Esses procedimentos serão utilizados na inspeção de amostras revestidas oriundas de ensaios de corrosão. A validação dos resultados obtidos nessas amostras será feita com procedimentos normalizados envolvendo definição do grau de empolamento (ASTM D 714), grau de corrosão (ASTM D 610) e perda de aderência (ASTM D 4541).

Palavras-chave: Revestimentos Orgânicos, Ensaios não-destrutivos, Ultra-Som, Phased Array.

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

EVALUATION OF FAILURES IN ANTICORROSIVE COATINGS BY ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE TEST METHOD

Bruno Pacheco da Silva

September/2011

Advisor: Isabel Cristina Pereira Margarit-Mattos

Co-Advisor: João Marcos Alcoforado Rebello

Course: Metallurgical Engineer

This work evaluates the performance of Ultrasonic Test Detection of defects in organic coatings. The most frequent failures are adhesion failures, blistering, apparent corrosion or corrosion under the paint film, deterioration of coating and application failures, for example, voids/bubbles between layers or at the interface between the coating and the metal substrate. This project is divided into four parts, namely: i) theoretical and literature review on the use of ultrasound in the evaluation of coatings, ii) assessment of the problem with a case study addressing the difficulty in detecting flaws in coatings considered high performance ones by the oil industry, iii) experimental work involving the preparation of specimens with defects intentionally introduced, with known dimensions and location. These samples will be evaluated by the technique of ultrasound using transducers with different frequencies and phased array, iv) the results obtained in the previous step will allow a technical study on the most appropriate procedures for the detection of each type of failure. These procedures will be used in the inspection of coated samples originated from corrosion tests. The validation of results obtained in these samples will be made with standard procedures involving the definition of degree of blistering (ASTM D 714), degree of corrosion (ASTM D 610) and loss of adhesion (ASTM D 4541).

Keywords: Organic Coatings, Nondestructive Testing, Ultrasound, Phased Array.

*A todos que contribuíram e torceram para que eu
chegasse até aqui...*

Agradecimentos

Muitas pessoas ajudaram nos bastidores, com comentários, sugestões e incentivo, e sou grato pelo envolvimento de todos. Não há espaço suficiente para listar todos os que contribuíram, mas gostaria de agradecer especialmente a Deus em primeiro lugar, por todas as graças em minha vida.

Agradeço também aos meus pais Sebastião Silva e Ercília Pacheco da Silva por tudo que me proporcionaram. E não poderia faltar um agradecimento a esposa do meu pai Deli Burlandy da Mota, pelo apoio e suporte.

Agradeço aos meus amigos, cujas dificuldades e alegrias dividimos juntos.

Agradecimentos extensivos a Prof.^a Isabel Cristina Pereira Margarit Mattos pela orientação, pela oportunidade de estágio no LNDC e pelo seu exemplo de líder e profissional. Ao Prof. João Marcos Alcoforado Rebello pela orientação e apoio.

Aos profissionais do LNDC, em especial Rômulo Moreira de Almeida, Rodrigo Sacramento da Silva, Ediléia Mendes de Andrade Silva, Walter Andrade de Souza, Fellipe Araújo dos Reis, Cosmelina Silva, Marcella Grosso e Jéssica Pisano Loureiro que diretamente ajudaram na elaboração deste trabalho. E a todos os outros que de alguma forma ajudaram direta ou indiretamente.

Ao meu orientador acadêmico, Achilles Junqueira Burdot Dutra, pelo incentivo, simpatia e presteza no auxílio quando necessário.

Sumário

Agradecimentos	7
Introdução	10
1. Ensaio por Ultra-som	12
1.1. Tipos de Ondas	13
1.2. Geração de Ondas Ultra-sônicas - <i>Efeito Piezométrico</i>	18
1.3. Tipos de Cristais	20
1.4. Tipos de Transdutores	20
1.5. Fatores que Afetam a Inspeção	22
1.5.1. Impedância Acústica	22
1.5.2. Campo Próximo ou Zona de Fresnel	23
1.5.3. Campo Distante ou Zona de Fraunhofer	25
1.5.4. Atenuação Sônica	25
1.5.5. Acoplantes	26
1.6. Técnica de Inspeção - <i>Pulso-Eco</i>	26
1.7. Phased Array	28
1.7.1. Princípio	28
1.8. Apresentação de Dados	28
1.9. Bell, Decibell e Ganho	31
1.10. Ângulo de Incidência	32
1.10.1. Ângulo Crítico	33
1.11. Propagação do Som em Meios Elásticos	34
1.12. Comprimento de Onda e Detecção de Defeitos	34
2. Revestimentos Anticorrosivos	35
2.1. Preparação de Superfície	36
2.2. Revestimentos Orgânicos – Tintas e Polímeros	40
2.2.1. Constituintes das Tintas	40
2.2.2. Propriedades das Tintas e Formação de Película	41
2.2.3. Falhas em Revestimentos Anticorrosivos	42
3. Estudo de Caso	43
4. Materiais e Métodos	46
4.1. Introdução	46
4.2. Corpos de Prova	46

4.2.1. Perda de Espessura do Substrato	46
4.2.2. Falha de Aderência entre o Substrato e o Revestimento.....	49
4.2.3. Características dos Revestimentos.....	50
4.3. Metalografia	50
4.4. Ultra-som.....	51
5. Resultados e Discussão	53
5.1. Análise Metalográfica e Contagem de Sólidos	53
5.2. Simulação com CIVA	57
5.2.1. Corpos de Prova com Defeitos Conhecidos.....	57
5.3. Rotina em Matlab.....	65
5.4. Inspeção Ultra-sônica em Amostras com Defeitos Controlados.....	65
5.4.1. Ultra-som Convencional.....	65
5.4.2. Phased Array	68
5.5. Inspeção em Amostras Provenientes de Ensaios de Corrosão.....	74
Conclusão	79
Referências.....	81
Anexo.....	84

Introdução

Ensaio não-destrutivo podem evitar a maioria das desvantagens dos métodos destrutivos, e especialmente o ensaio por ultra-som tem recebido maior atenção nos últimos anos. Não é apenas econômico e confiável, mas também tem um grande campo de aplicação, uma ampla gama de tipos de defeitos detectáveis e forte capacidade de penetração [1].

O ultra-som é uma forma de energia que se caracteriza por vibrações mecânicas que se propagam num meio material. As frequências dessas ondas ultra-sônicas são maiores que 20 kHz, o que as tornam inaudíveis ao ser humano [2, 3].

Sons emitidos em qualquer ambiente se refletem em obstáculos, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes. Fenômenos desta natureza, embora simples e freqüentes em nossa vida cotidiana, constituem os fundamentos do ensaio ultra-sônico de materiais.

Do mesmo modo como uma onda sonora reflete ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultra-sônica ao percorrer um meio elástico refletirá da mesma forma ao incidir numa descontinuidade ou falha interna em um determinado material inspecionado. Através de aparelhos especiais, conseguimos detectar as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando as descontinuidades.

O ensaio por ultra-som é uma método não destrutivo no qual feixes de ondas sonoras de alta frequência são introduzidos nos materiais para a detecção de falhas na superfície ou abaixo da superfície do material. As ondas de som viajam através do material com alguma perda de energia (atenuação) e são refletidas nas interfaces. O feixe refletido é exibido e depois analisado para definir a presença e localização de falhas ou descontinuidades [4].

A figura 1 mostra esquematicamente o princípio básico da técnica de inspeção por ultra-som.

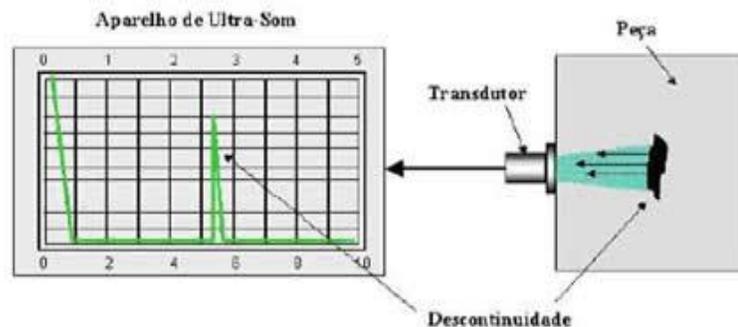


Fig. 1. Princípio Básico da inspeção de Materiais por ultra-som [5].

O grau de reflexão depende bastante do estado físico do material que forma a interface, e em menor grau das propriedades físicas específicas do material. Por exemplo, ondas sonoras são quase que completamente refletidas em interfaces metal/gás. Reflexão parcial ocorre em interfaces metal/líquido ou metal/sólido, com percentual específico de energia refletida dependendo principalmente de razões de certas propriedades do material em lados opostos da interface [4].

A manutenção preditiva de máquinas e equipamentos vem encontrando aceitação crescente na indústria. Manutenção preditiva consiste basicamente em monitorar parâmetros que caracterizam a condição de estruturas ou máquinas de forma a poder detectar, prever a época provável de ocorrência, e se possível, diagnosticar o tipo de falha para que se possa planejar a operação de manutenção na ocasião e de forma conveniente [6].

A inspeção por ultra-som é entre os ensaios não-destrutivos, um dos métodos mais amplamente utilizados. A aplicação primária na inspeção de metais é a detecção e caracterização de falhas internas, é utilizada também para detectar descontinuidades na superfície, para medida de espessura e extensão da corrosão, e (com muito menos frequência) para determinar propriedades físicas, estrutura, tamanho de grão e constantes elásticas.

A causa básica da corrosão é conhecida. Os metais apresentam uma condição termodinâmica instável e tendem a mudar para uma condição estável pela formação de óxidos, hidróxidos, sais, etc. [7]. Desta forma, a corrosão é um acontecimento natural e indesejável. Para evitar, ou ainda melhor, minimizar essa tendência termodinâmica dos metais, dispõe-se de vários métodos.

Do ponto de vista industrial, tanto o ferro como o aço-carbono assumem primordial importância. 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 [7].

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.

Neste projeto serão apresentados estudos sobre alguns aspectos do uso de ondas ultra-sônicas para a detecção e avaliação de falhas em componentes revestidos. Algumas destas falhas são simuladas, ou seja, feitas de forma proposital. E outras são falhas que os revestimentos apresentaram em condições de serviço. A adequação da técnica de inspeção na detecção destes tipos de falhas será discutida ao longo do presente trabalho.

1. Ensaio por Ultra-som

O ensaio por ultra-som é um método não destrutivo que tem como objetivo principal a detecção de defeitos ou descontinuidades internas ou superficiais, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais, sejam ferrosos ou não ferrosos.

A inspeção por ultra-som é um eficiente instrumento para avaliação do módulo de elasticidade, resistência, rigidez e outros parâmetros que são vitais para análise e dimensionamento de estruturas [8]. Portanto, o exame ultra-sônico, tal como todo ensaio não destrutivo, visa reduzir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades.

Assim como todo ensaio não-destrutivo, o ensaio ultra-sônico possui vantagens e limitações nas aplicações, como segue [4, 9]:

Vantagens em relação a outros ensaios:

- ✓ Alta sensibilidade, permitindo a detecção de falhas extremamente pequenas.
- ✓ Maior precisão que outros métodos não destrutivos na determinação da posição de falhas internas, estimar seu tamanho, e caracterizar a sua orientação, forma e natureza.
- ✓ Apenas uma superfície precisa ser acessível.
- ✓ A operação é eletrônica, que fornece resposta quase instantânea aos indícios de falhas. Isso torna o método adequado para o acompanhamento em linha de produção e controle do processo.
- ✓ Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção.
- ✓ Não oferece perigo para operações ou para pessoal próximo e não tem efeito sobre equipamentos e materiais na vizinhança. É uma técnica mais segura e simples que técnicas com raios γ ou raios X.

Limitações em relação a outros ensaios:

- ✓ A operação manual exige muita atenção por técnicos experientes.
- ✓ Extenso conhecimento técnico é necessário para o desenvolvimento de procedimentos de inspeção.
- ✓ Peças que são de forma rugosa e irregular, muito pequenas ou finas, ou não homogêneas são difíceis de inspecionar.

- ✓ Acoplantes são necessários para proporcionar efetiva transferência de energia das ondas ultra-sônicas entre transdutores e peças que estão sendo inspecionadas.
- ✓ Padrões de referência são necessários, tanto para calibrar o equipamento e para a caracterização de falhas.
- ✓ Possibilidade de existência de alto poder de atenuação do sinal de ultra-som para certos tipos de materiais (fibra, emulsões e misturas), necessidade de processamento de sinais de alta frequência, direcionamento do feixe, a complexidade do campo ultra-sônico.

Campo de Aplicação

A inspeção ultra-sônica é usada para controle de qualidade e inspeção de materiais em todas as grandes indústrias. Isso inclui elétrica e fabricação de componentes eletrônicos, produção de materiais metálicos e compósitos, e fabricação de estruturas como fuselagens, tubulação e vasos de pressão, navios, pontes, veículos, máquinas e motores. Em serviço a inspeção ultra-sônica para a manutenção preventiva é usada para detectar o colapso iminente do material, máquinas de terraplenagem, rolos do moinho, equipamentos de mineração, sistemas nucleares e outras máquinas e componentes.

1.1. Tipos de Ondas

Com base no modo de deslocamento da partícula, ondas ultra-sônicas são classificadas como ondas longitudinais, ondas transversais, ondas de superfície e ondas de Lamb. Estes quatro tipos serão descritos a seguir.

Ondas Longitudinais

Algumas vezes chamadas de ondas de compressão, é o tipo de onda ultra-sônica mais amplamente usada na inspeção de materiais.

São ondas cujas partículas oscilam na direção de propagação da onda, podendo ser transmitidas a sólidos, líquidos e gases.

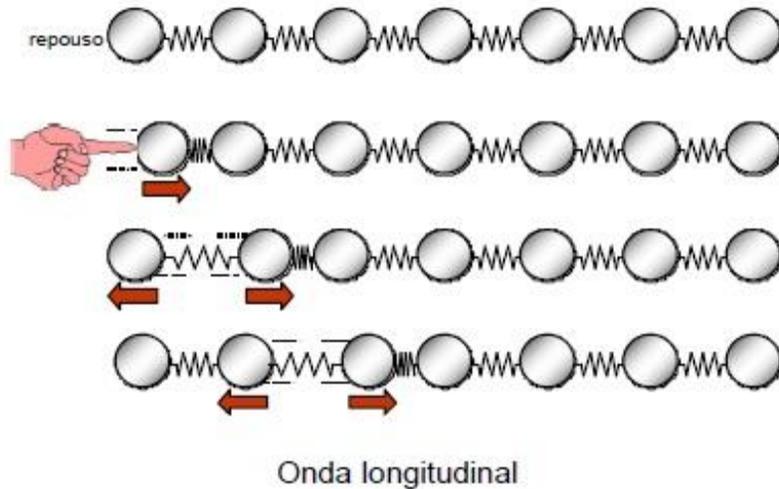


Fig. 2. Modo de propagação das ondas longitudinais [5].

Na figura 2 nota-se que o primeiro plano de partículas vibra e transfere sua energia cinética para os próximos planos de partículas que passam a oscilar. Desta maneira, todo o meio elástico vibra na mesma direção de propagação da onda (longitudinal) e aparecem “zonas de compressão” e “zonas diluídas”. As distâncias entre duas zonas de compressão determinam o comprimento de onda (λ) [5].

Em decorrência do processo de propagação, este tipo de onda possui uma alta velocidade de propagação, característica do meio [5]. Na tabela 1 são dadas velocidades para alguns materiais.

Tabela 1. Velocidades de propagação das ondas longitudinais [5].

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

Algumas vezes chamadas de ondas de cisalhamento, também são consideravelmente usadas na inspeção ultra-sônica de materiais.

Uma onda transversal é definida, quando as partículas do meio vibram na direção perpendicular ao de propagação (figura 3). Neste caso, observamos que os planos de partículas mantêm-se na mesma distância um do outro, movendo-se apenas verticalmente [5].

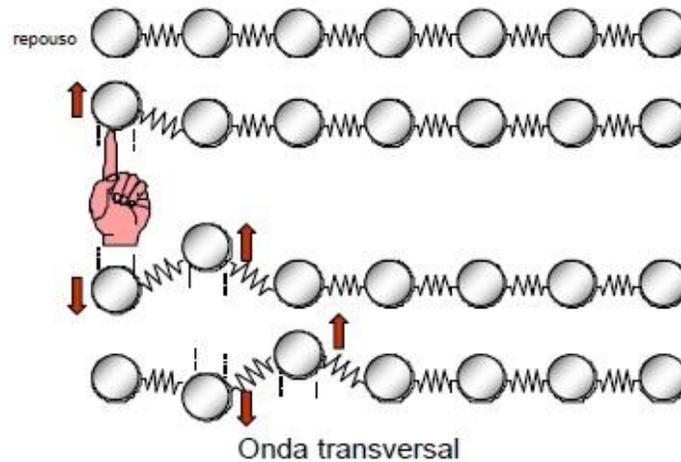


Fig. 3. Modo de propagação das ondas transversais [5].

As partículas oscilam na direção transversal à direção de propagação, podendo ser transmitidas somente a sólidos. As ondas transversais são praticamente incapazes de se propagarem nos líquidos e gases, pela característica das ligações entre partículas destes meios. O comprimento de onda é a distância entre dois “vales” ou dois “picos” [5].

Tabela 2. Velocidades de propagação das ondas transversais [5].

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

O ar e a água não suportam ondas transversais. Nos gases, as forças de atração entre as moléculas são tão pequenas que ondas de cisalhamento não podem ser transmitidas. O mesmo é verdadeiro para um líquido, a menos que seja particularmente viscoso ou esteja presente como uma fina camada [4].

Ondas Superficiais

É outro tipo de onda ultra-sônica utilizada na inspeção de materiais, também conhecidas como ondas de *Rayleigh*. As ondas de superfície estão sujeitas a atenuação em um dado material, como estão as ondas longitudinais ou transversais. Elas têm uma velocidade aproximadamente 90% da velocidade da onda transversal no mesmo material [4].

Ondas de Rayleigh que se propagam ao longo de uma interface fluido-sólido tem sido um meio efetivo para detectar defeitos subsuperficiais e superficiais. Estudos com ondas superficiais têm sido relatados durante os últimos 40 anos [10, 11].

A propagação deste 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 [4].

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 [12].

Nas ondas de superfície, 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 [4]. Ondas de superfície podem existir em formas complexas que são variações da forma de onda simplificada ilustrada na figura 4.

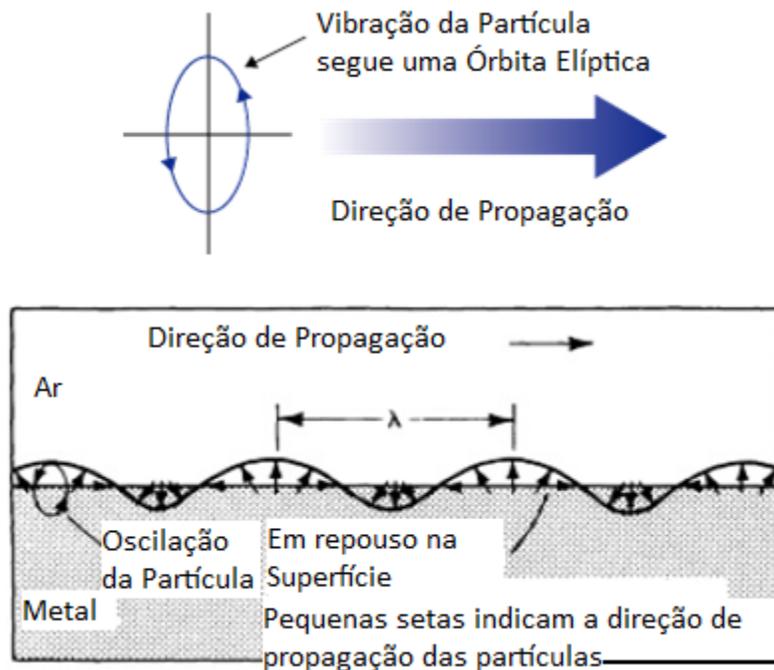


Fig. 4. Diagrama de propagação das ondas de superfície (Rayleigh) na superfície do metal na interface metal/ar. O comprimento de onda λ é a distância correspondendo a um ciclo completo [4, 9].

Ondas de Lamb

São conhecidas também como ondas de placa, é outro tipo de onda ultra-sônica que é utilizada na inspeção não destrutiva de materiais.

Ondas de Lamb 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 ocorre em toda a espessura do material. As características de propagação das ondas de Lamb dependem da densidade, propriedades elásticas e estrutura do material, bem como da espessura da peça de teste e da frequência [4].

As ondas de Lamb podem ser geradas a partir das ondas longitudinais incidindo segundo um ângulo de inclinação em relação à chapa.

Existem duas formas básicas de ondas de Lamb:

- ✓ simétrica, ou de dilatação
- ✓ assimétrica, ou flexão

A forma é determinada pelo fato do 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 (figura 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 (figura 5b). A razão

entre o maior e o menor eixo da elipse é função do material no qual a onda está sendo propagada [4].

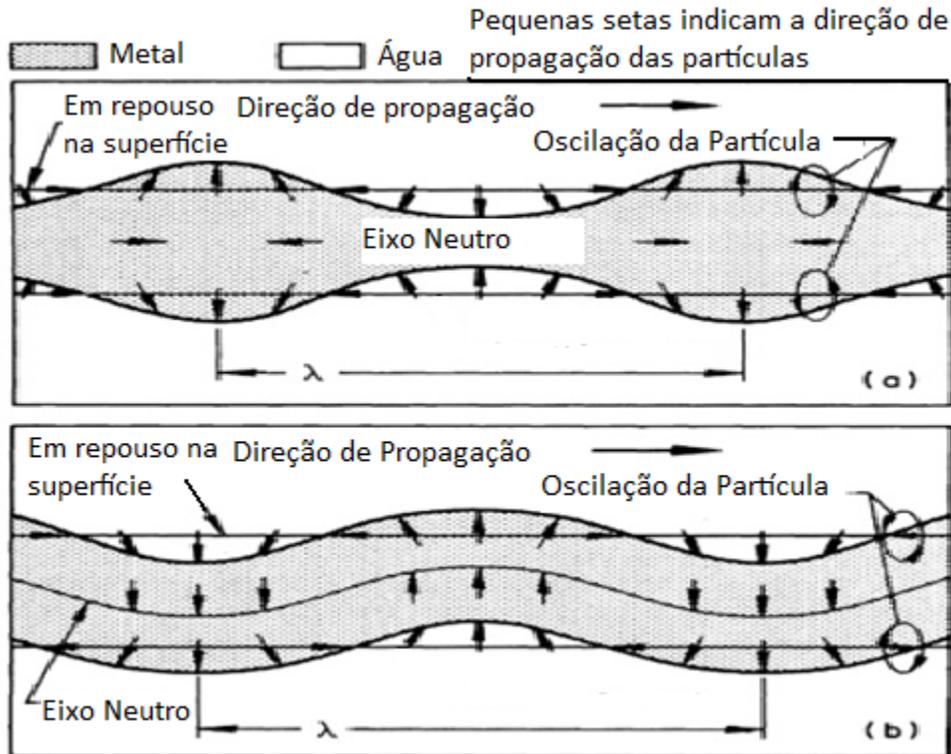


Fig. 5. As duas formas das ondas de Lamb, simétrica (a) e assimétricas (b) [4].

A escolha do modo de onda a ser utilizado em uma inspeção normalmente considera [13]:

- Coexistência de diferentes modos entrando na peça;
- Possíveis conversões de modo na peça;
- Relação entre o comprimento da onda na peça e a dimensão mínima de defeito a se detectar;
- Atenuação para o modo e comprimento de onda na distância a ser inspecionada.

Modos desnecessários e conversões de modo indesejadas complicariam a análise dos resultados.

1.2. Geração de Ondas Ultra-sônicas - Efeito Piezelétrico

Em 1880 os irmãos Curie descobriram o efeito piezelétrico em cristais, e um ano mais tarde Lipmann previu que o efeito inverso, mudanças dimensionais em consequência de um campo elétrico aplicado, existia [14].

Os materiais piezelétricos são denominados de "materiais inteligentes" e pertencem a uma classe de dielétricos que exibem deformação significativa em resposta a

aplicação de um campo elétrico. Estes materiais, também, produzem uma polarização dielétrica, ou seja, um campo elétrico em resposta a deformação no material. Esta dupla propriedade exibida pelos materiais piezelétricos torna extremamente vantajosa a aplicação destes materiais para sistemas de controle e para localização e caracterização de falhas estruturais [15].

A conversão de pulsos elétricos em vibrações mecânicas e de vibrações mecânicas em energia elétrica é a base do método ultra-sônico.

Os materiais piezelétricos (cristais) possuem a propriedade de sofrer polarização (surgimento de cargas elétricas) quando são deformados por esforços mecânicos externos (efeito piezelétrico direto). Inversamente estes materiais têm sua forma alterada quando seus dipolos se alinham espontaneamente sob ação de um campo elétrico externo, causando deformação da estrutura cristalina (efeito piezelétrico inverso). Em outras palavras: quando uma tensão elétrica é aplicada na mesma direção da polarização, o material alonga na direção polar e ocorre uma contração transversal. Quando a tensão elétrica é aplicada oposta à direção de polarização, o material contrai na direção polar e expande na direção transversal [15]. Este efeito pode ser observado na figura 6.

Tal fenômeno é obtido aplicando-se eletrodos no cristal piezelétrico com tensão elétrica alternada da ordem de 1000 V, 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 freqüência de excitação e das dimensões do cristal [5].

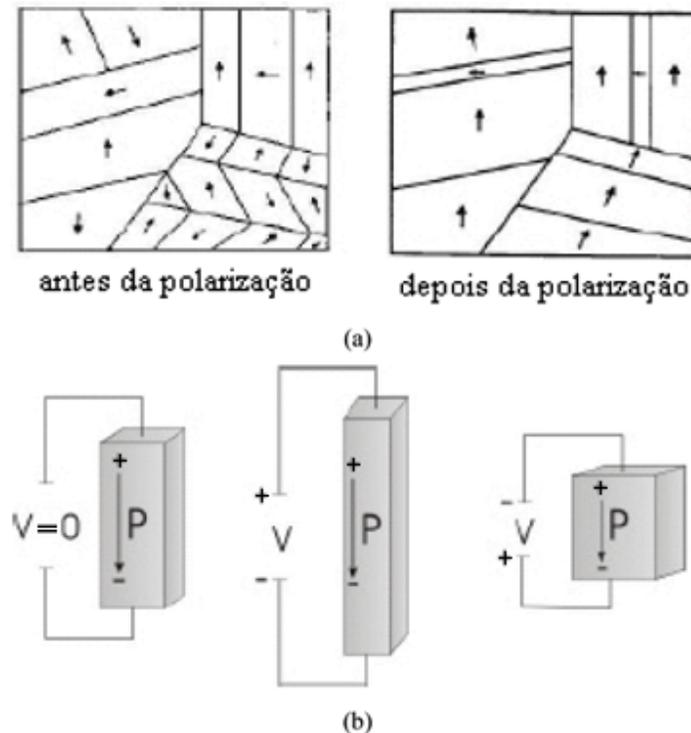


Fig. 6. (a) Alinhamento dos cristais após a polarização; (b) efeito piezelétrico [14].

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

1.3. Tipos de Cristais

Materiais piezelétricos são: o quartzo, o sulfato de lítio, o titanato de bário, o metaniobato de chumbo.

Quartzo é o material piezelétrico mais antigo, translúcido e duro como o vidro, sendo cortado a partir de cristais originários no Brasil. Sulfato de Lítio é um cristal sensível a temperatura e pouco resistente. Titanato de Bário e metaniobato de chumbo são materiais cerâmicos que recebem o efeito piezelétrico através de polarização [5].

Esses dois últimos cristais são os melhores emissores, produzindo impulsos ou ondas de grande energia, se comparadas com aquelas produzidas por cristais de quartzo. Para a inspeção ultra-sônica, interessa não só a potência de emissão, mas também a sensibilidade da recepção (resolução). A frequência ultra-sônica gerada pelo cristal dependerá da sua espessura, cerca de 1 mm para 4 MHz e 2 mm para 2 MHz [5].

1.4. Tipos de Transdutores

Transdutores de ultra-som são fabricados para um vasto campo de aplicações e podem ser fabricados personalizados, se necessário. 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 otimizar a inspeção. Na maioria das vezes o transdutor é escolhido tanto para melhorar a sensibilidade ou a resolução do sistema.

Transdutores são classificados em grupos de acordo com a aplicação.

Transdutores de contato são usados para as inspeções de contato direto, e são geralmente manipulados com a mão. Eles têm elementos protegidos em uma resistente caixa para suportar contato e o atrito com uma variedade de materiais. 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 abaixo ilustra a inspeção realizada com esse tipo de transdutor.

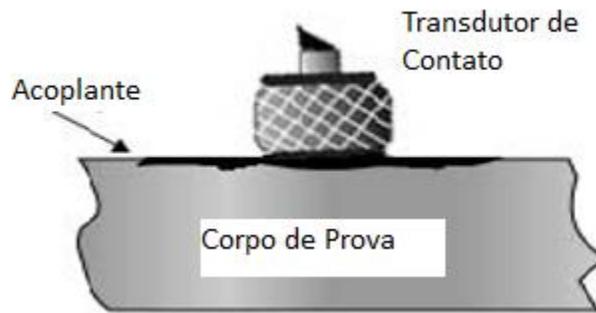


Fig. 7. Inspeção realizada com transdutor de contato [9].

Transdutores de imersão não entram em contato com o componente a ser inspecionado. Estes transdutores são projetados para operar em um ambiente líquido e todas as conexões são a prova d'água. A figura 8 ilustra a inspeção realizada com esse tipo de transdutor.

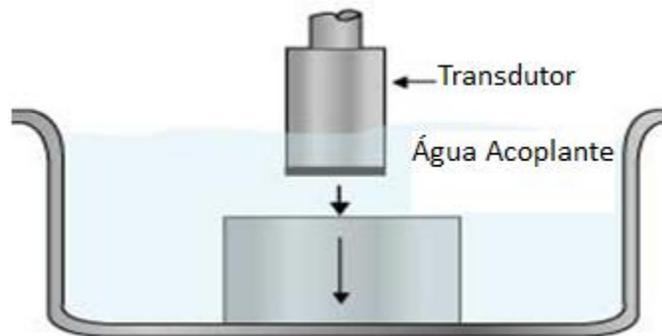


Fig. 8. Inspeção realizada com transdutor de imersão [9].

Existem três tipos básicos de transdutores de ultra-som: angular, reto ou normal e o duplo-cristal.

Transdutores angulares – nestes tipos de transdutores o cristal forma um determinado ângulo com a superfície. Este ângulo é conseguido com o uso de uma cunha de plástico que é inserida entre o cristal piezolétrico e a superfície.

O ângulo nominal, sob o qual o feixe ultra-sônico 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 [5].

O cristal piezolétrico com dimensões que podem variar entre 8 x 9 mm até 15 x 20 mm, somente recebe ondas ou impulsos ultra-sônicos que penetram na cunha em uma direção paralela à de emissão, em sentido contrário. A cunha de plástico funciona como amortecedor para o cristal piezolétrico após a emissão dos impulsos [5].

Transdutores retos ou normais - são assim chamados os cabeçotes monocristal geradores de ondas longitudinais normais à superfície de acoplamento [5].

Transdutores retos são construídos com um cristal acoplado a um bloco rígido chamado de amortecedor. 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 ultra-sônica que passa através do 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 [5].

Transdutores Duplo-Cristal - Existem problemas de inspeção que não podem ser resolvidos nem com transdutores retos nem com angulares. 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 piezolétrico recebe uma “resposta” num espaço de tempo curto após a emissão, não tendo suas vibrações sido amortecidas suficientemente [5].

Neste caso, um transdutor duplo cristal pode ajudar a inspeção. Nesses transdutores dois cristais são incorporados. Cada um deles é responsável pela emissão e recepção separadamente. 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 [5].

1.5. Fatores que Afetam a Inspeção

Abaixo serão descritos alguns dos principais fatores que afetam a inspeção ultra-sônica.

1.5.1. Impedância Acústica

A impedância acústica de um meio está relacionada com a resistência ou em outras palavras, a dificuldade do meio a 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 em [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]:

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

$$\text{Energia do som transmitida} + \text{Energia do som refletida} = 1$$

1.5.2. Campo Próximo ou Zona de Fresnel

Nas proximidades do cristal piezelétrico existe uma região com grande interferência ondulatória denominada *campo próximo* ou *zona de Fresnel*.

O campo próximo representa para efeitos práticos, uma dificuldade na avaliação ou detecção de pequenas discontinuidades, isto é, menores que o diâmetro do transdutor, situadas nesta região próximas do transdutor. Portanto, o inspetor de ultrassom deve ficar atento a este problema [3].

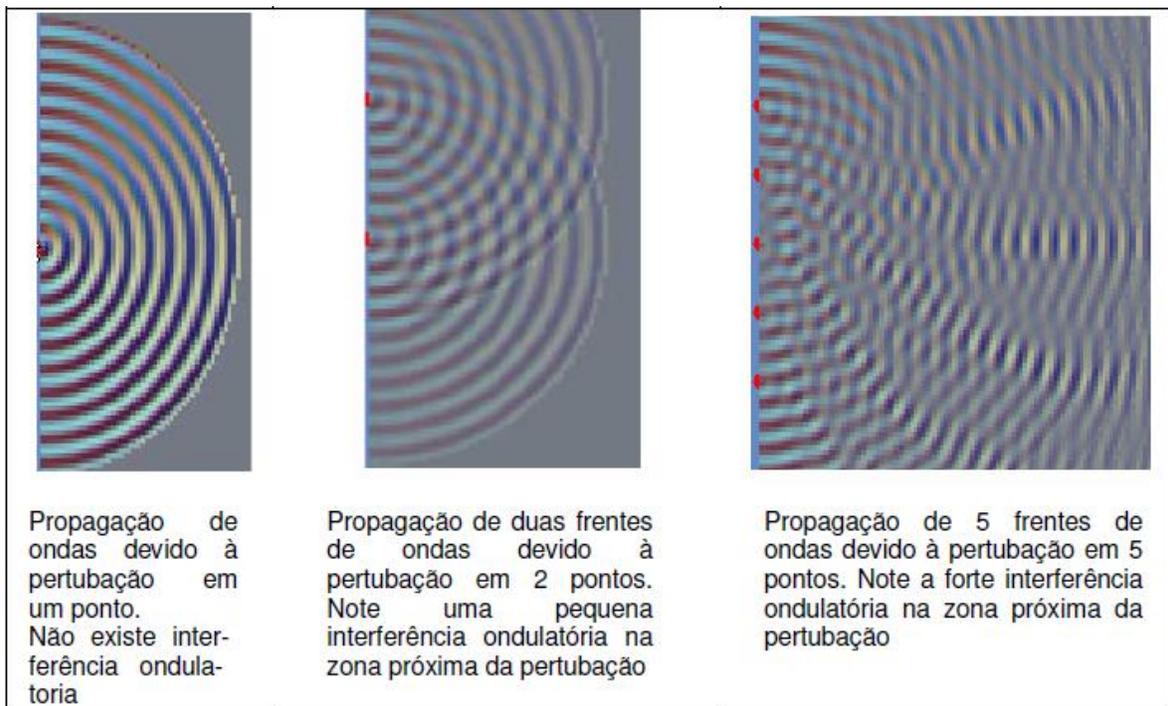
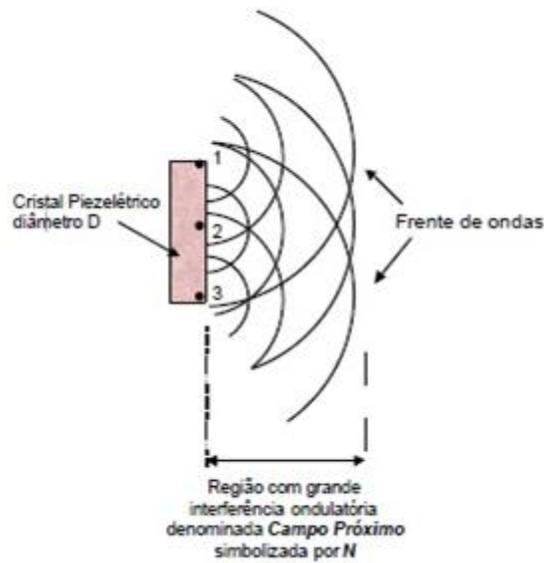


Fig. 9. Campo sônico nas proximidades do cristal [5].

A figura 9 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, 3, 4 e 5. À medida que nos afastamos do cristal, as interferências vão diminuindo e desaparecendo, tornando uma só frente de onda [5].

1.5.3. 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 quase que com o inverso do quadrado da distância [5].

Devido ao campo distante, ao campo próximo e ao fenômeno de divergência o campo sônico tem a forma como visto no esquema abaixo.

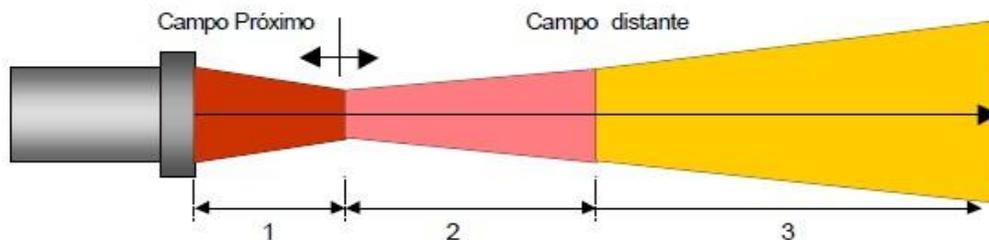


Fig. 10. Classificação teórica das zonas do campo sônico [5].

O campo sônico é representado na literatura conforme a figura 10. A região 1, é onde pequenas discontinuidades são mais difíceis de serem detectadas (*campo próximo*), a região 2 discontinuidades maiores podem ser detectadas e na região 3 é onde qualquer discontinuidade compatível com o comprimento de onda pode ser detectada.

1.5.4. Atenuação Sônica

A onda ultra-sônica ao percorrer um material qualquer sofre em sua trajetória efeitos de dispersão e absorção, resultando na redução da sua energia durante o 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 ultra-som, 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.

1.5.5. Acoplantes

Quando acoplamos o transdutor a peça a ser ensaiada, imediatamente forma-se uma camada de ar entre o 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 diferente do material a ser inspecionado.

Como já mencionado no presente trabalho, a impedância acústica é definida como sendo o produto da densidade do meio pela velocidade de propagação neste meio, e representa a quantidade de energia acústica que se reflete e transmite para o meio.

Como exemplo, podemos citar que a interface água e aço apenas transmite 12% e reflete 88% da energia ultra-sônica. 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 [5].

A tabela 3 mostra os acoplantes mais comumente utilizados.

Tabela 3. Impedância acústica, velocidade da onda longitudinal e densidade de alguns materiais [5].

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

1.6. Técnica de Inspeção - *Pulso-Eco*

A técnica ultra-sônica pulso-eco é a mais largamente utilizada devido principalmente a sua simplicidade e eficiência. Esta técnica envolve a detecção de ecos produzidos pela reflexão, do pulso ultra-sônico, em uma descontinuidade presente no material ou pela interface do corpo de prova. É utilizado apenas um transdutor para emitir

o pulso ultra-sônico (emissor) e receber o eco refletido (receptor). Quando o pulso emitido encontra uma superfície refletora, parte ou toda a energia é refletida, retornando ao transdutor. A porcentagem de energia que é refletida é diretamente dependente do tamanho da superfície refletora em relação ao tamanho do feixe ultra-sônico 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 [16].

Uma das vantagens desta técnica é a grande sensibilidade para detecção de pequenas discontinuidades presentes no material, além de detectar com precisão discontinuidades logo abaixo da superfície de entrada do feixe sônico. Aumentando assim, a região de detecção de falhas internas ao material [4, 17, 18].

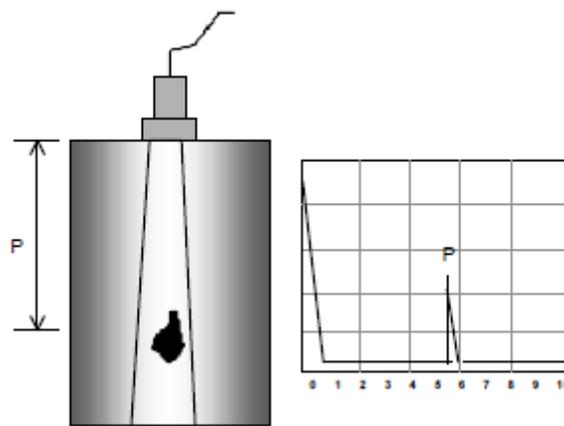


Fig. 11. Inspeção realizada com a técnica pulso-eco [5].

A figura 11 ilustra a inspeção realizada com esta técnica. A inspeção ocorre da seguinte maneira:

- 1- O cristal piezelétrico do transdutor transmite à peça uma onda ultra-sônica perpendicularmente à superfície, que percorre a espessura relativa à profundidade do defeito;
- 2- A onda incide no defeito e retorna ao cristal e produz um sinal elétrico que será amplificado e registrado na tela do aparelho na forma do pulso ou eco, identificado na figura acima como "P";
- 3- O percurso sônico é duas vezes a profundidade do defeito, a ida e a volta da onda ultra-sônica. Isto sempre ocorre na inspeção por ultra-som os circuitos do aparelho compensam este fenômeno dividindo por 2 os registros na tela.

1.7. Phased Array

A técnica de Phased Array tem a capacidade de modificar as características acústicas de uma sonda ultra-sônica, isso é feito controlando eletronicamente a emissão e recepção dos sinais em cada elemento transdutor de uma sonda com múltiplos transdutores [19].

É um método avançado de ensaio não-destrutivo que emprega os mesmos princípios físicos do ultra-som convencional, permitindo a detecção de descontinuidades internas nos mais diversos tipos de materiais, inclusive naqueles que apresentam geometria complexa, usado em substituição à radiografia e ao ultrassom manual com registro de 100% da área inspecionada [20].

1.7.1. Princípio

Utiliza o princípio piezométrico. Feixes ultra-sônicos são criados em qualquer modo e ângulo a partir do mesmo transdutor por meio de software específico que comanda o disparo de diversos conjuntos de transdutores, gerando um feixe sônico por meio de interferência construtiva entre impulsos na mesma fase [20].

Os transdutores de ultra-som convencional apresentam apenas um cristal piezométrico enquanto que os transdutores Phased Array apresentam um arranjo de cristais que podem ser excitados individualmente. Da possibilidade de excitação individual dos cristais em tempos diferentes e controlados surge a característica de permitir a inspeção com uma grande variedade de ângulos de inspeção. Da mesma forma é possível variar e controlar os pontos focais do feixe na peça [19].

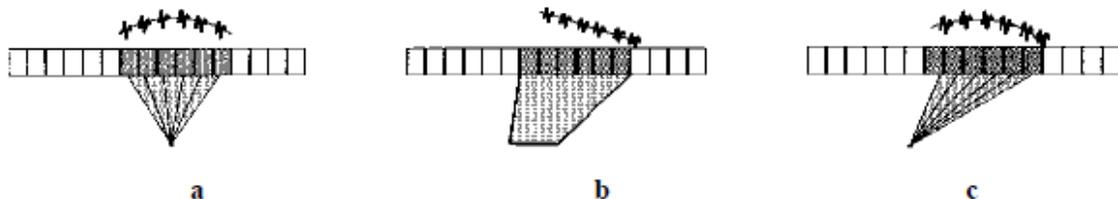


Fig. 12. Transdutor phased array de múltiplos elementos com alguns excitados em tempos diferentes [19].

- a – para focalizar o feixe sônico a uma certa profundidade
- b – para propiciar a angulação do feixe sônico
- c – para propiciar a angulação e a focalização do feixe sônico

1.8. Apresentação de Dados

Dados de ultra-som podem ser coletados e mostrados em um número de diferentes formatos. Três formatos mais comuns são conhecidos no mundo dos END, que

são as apresentações A-scan, B-scan e C-scan. Cada modo de apresentação fornece um tipo diferente de vista e avaliação da região do material sendo inspecionada. Sistemas computadorizados modernos de ultra-som podem mostrar dados em três formas de apresentações simultaneamente [4, 9].

A-scan: A apresentação mais básica de dados de forma de onda ultra-sônica é sob a forma de um A-scan, ou 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.

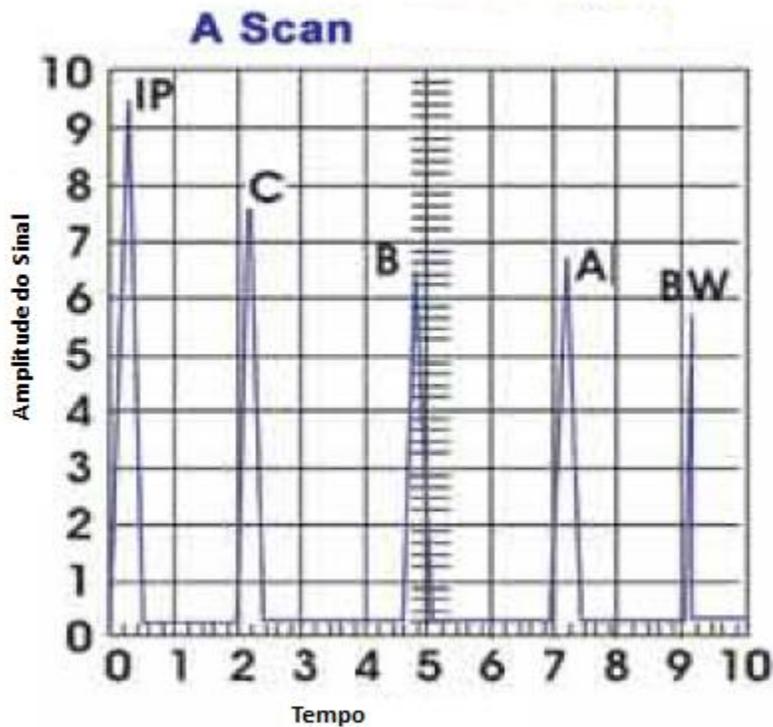


Fig. 13. Apresentação de dados em formato A-scan [9].

Na figura 13, IP (initial pulse) é o pulso inicial gerado pelo transdutor, A, B e C são os ecos provenientes de diferentes falhas no material e BW (backwall) é o eco de fundo.

B-scan: A apresentação B-scan é uma vista (transversal) de perfil da amostra. No 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.

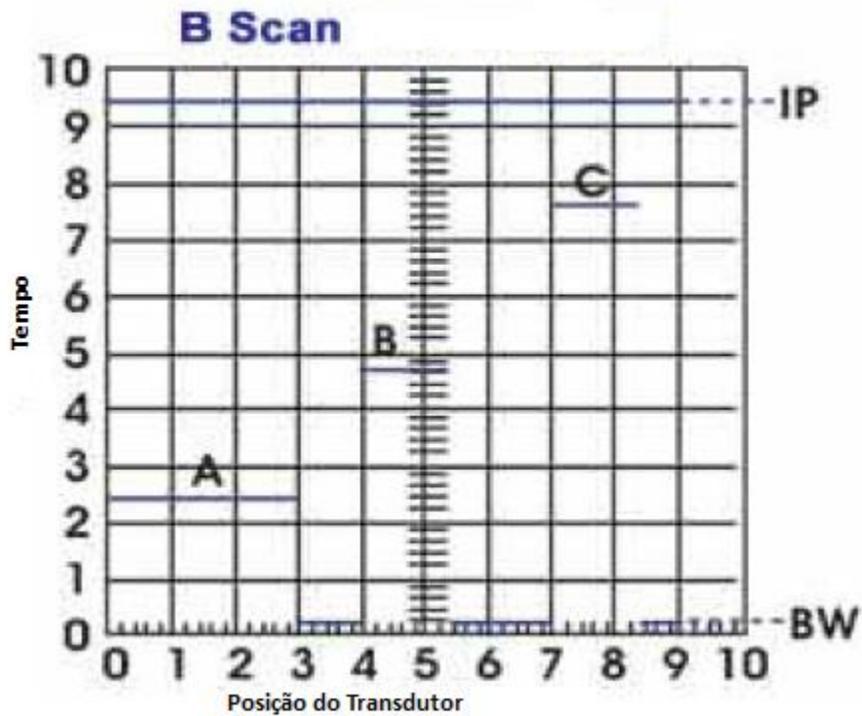


Fig. 14. Apresentação de dados em formato B-scan [9].

C-scan: Outra opção de apresentação é um C-scan, uma apresentação de duas dimensões dos dados mostrados como uma vista superior ou planar de um corpo de prova. Para ultra-som convencional, um scanner mecânico com codificadores é usado para controlar as coordenadas do transdutor para a resolução do sinal desejada.

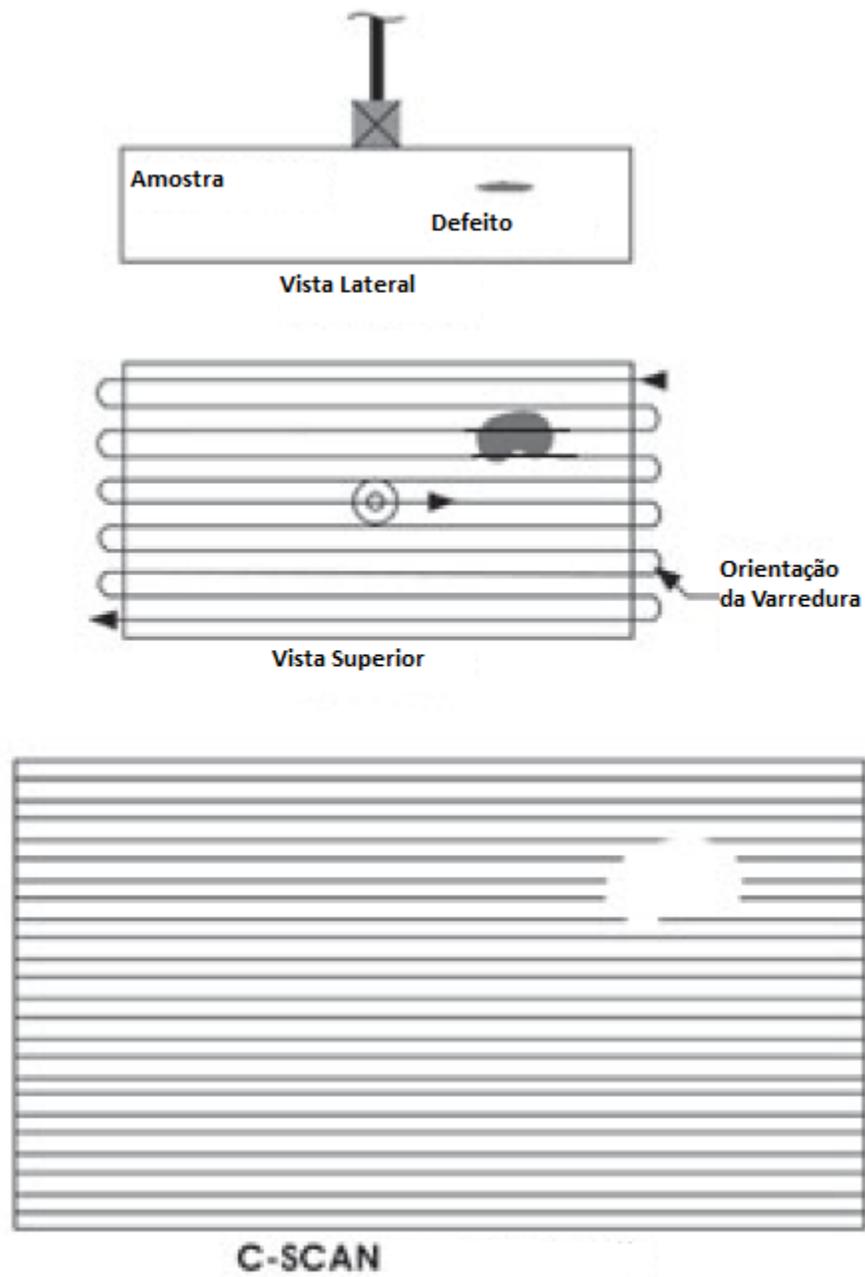


Fig. 15. Apresentação de dados em formato C-scan [9].

1.9. Bell, Decibell e Ganho

Nível de Intensidade Sonora:

O “Bell” abreviado “B” é uma grandeza que define o nível de intensidade sonora (NIS) que compara as intensidades de dois sons quaisquer, como segue:

$$N.I.S = \log I/I_0 B \quad (\text{Nível de intensidade sonora})$$

Onde I e I_0 são duas intensidades sonoras medidas em Watts por centímetros quadrados (W/cm^2).

Por outro lado, o decibell equivale a 1/10 do Bell e em geral é normalmente utilizado para medidas de N.I.S. e, portanto a equação será:

$$N.I.S = \log 10 I/I_0 dB$$

Entretanto, a teoria dos movimentos harmônicos na propagação ondulatória nos ensina que a intensidade de vibração é proporcional ao quadrado da amplitude sonora, $I = (A^2)$, e portanto devemos reescrever na forma de N.A.S (nível de amplitude sonora):

$$N.A.S = 10 \log A^2/A_0^2 dB \quad (\text{Nível de amplitude sonora})$$

$$N.A.S = 20 \log A/A_0 dB$$

Esta relação pode ser entendida como sendo a comparação efetuada por um sistema eletrônico de duas amplitudes de sinais, emitida e recebida pelo transdutor ultrassônico, ou simplesmente conhecido por “Ganho”.

1.10. Ângulo de Incidência

Quando a onda ultra-sônica incide com certo ângulo na interface entre dois materiais (incidência normal, isto é, ângulo de incidência = 0°) ocorre transmissão e reflexão na interface, sem mudança na direção do feixe. Em outro ângulo de incidência, os fenômenos do modo de conversão (uma mudança na natureza do movimento da onda) e refração (uma mudança na direção de propagação da onda) devem ser considerados. Estes fenômenos podem afetar todo o feixe ou apenas uma porção, e o total das mudanças que ocorrem na interface dependem do ângulo de incidência e da velocidade das ondas ultra-sônicas deixando o ponto de impacto na interface [4].

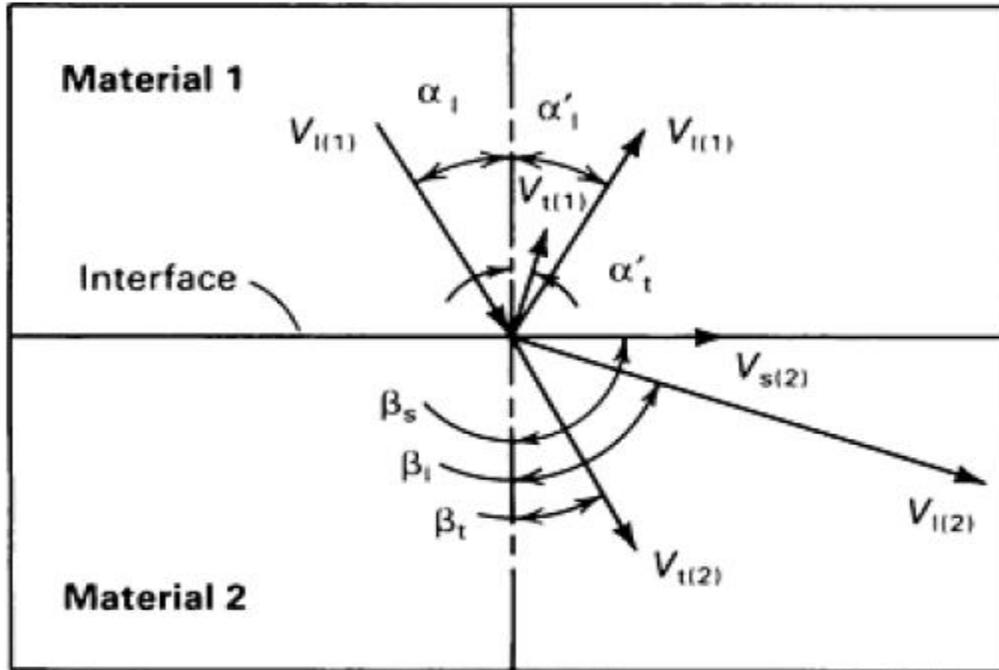


Fig. 16. A figura acima mostra (por vetores) todas as possíveis relações de ondas refletidas e refratadas para uma onda longitudinal de velocidade $V_{l(1)}$ incidindo na interface com um ângulo α_i em relação a normal [4].

A lei geral que descreve o comportamento da onda em uma interface é conhecida como lei de Snell. A lei de Snell se aplica mesmo se o fenômeno do modo de conversão tiver lugar [4]. Matematicamente a lei de Snell pode ser expressa como:

$$\frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Sen } \beta} = \frac{V_1}{V_2}$$

1.10.1. Ângulo Crítico

Se o ângulo α_i da figura 16 for pequeno, ondas sonoras se propagando em dado meio podem sofrer modo de conversão na interface, resultando em propagação simultânea de ondas longitudinais e transversais (cisalhamento) no segundo meio. Quando uma onda longitudinal move-se a partir de um material mais lento para um mais rápido, existe um ângulo de incidência que torna o ângulo de refração da onda igual a 90° , acima deste ângulo a onda longitudinal refratada não irá mais se propagar no material, deixando apenas a onda transversal (modo convertido) refratada se propagando no segundo meio. Este é conhecido como primeiro ângulo crítico [4, 9]. Se α_i aumentar além do primeiro ângulo crítico, a direção da onda transversal refratada irá se aproximar do plano formado pela superfície ($\beta_t \rightarrow 90^\circ$). Em um segundo valor específico de α_i , β_t irá ser exatamente igual a 90° , acima do qual a onda transversal refratada não irá se propagar no material. Este segundo valor de α_i é chamado de segundo ângulo crítico [4].

Ângulos críticos são de especial importância na inspeção ultra-sônica. Inspeção com ondas superficiais é realizada ajustando o ângulo incidente de um transdutor do tipo contato, de modo que é de alguns décimos de um grau maior do que o segundo ângulo crítico. Neste valor, a onda transversal refratada é substituída por uma onda de Rayleigh viajando ao longo da superfície do material [4]. Como mencionado anteriormente neste trabalho, as ondas de Rayleigh podem ser efetivamente sustentadas apenas quando o meio de um lado do interface (neste caso, a superfície do corpo de prova) é um gás. Conseqüentemente, a inspeção com ondas de superfície é usada principalmente com métodos de contato.

1.11. Propagação do Som em Meios Elásticos

Um meio elástico é constituído de qualquer material que tende a preservar seu comprimento, forma e volume contra as forças externas. Tais materiais possuem forças restauradoras que tendem a retornar o material à sua condição original após a remoção das forças externas. A força restauradora é característica do material e tem origem nas forças de ligação entre seus átomos ou moléculas individuais.

A velocidade de propagação da onda em meio elástico depende, em geral, da elasticidade e densidade do meio.

Sabe-se que a densidade e as características de elasticidade do meio variam com a temperatura e a pressão desse meio, logo a velocidade de propagação dependerá da temperatura e da pressão.

Refere-se como meio não-dispersivo aquele em que a forma da onda não se altera a medida que a onda se propaga e sua velocidade é constante, desde que sejam fixadas as características de elasticidade e a densidade do meio.

Uma onda de ultra-som pode ser visualizada como um número infinito de massas oscilantes ou partículas conectadas por meio de molas elásticas. Cada partícula individual é influenciada pelo movimento do vizinho mais próximo e ambas as forças de restauração inerciais e elásticas atuam sobre cada partícula [9].

1.12. Comprimento de Onda e Detecção de Defeitos

No teste de ultra-som o inspetor deve tomar uma decisão sobre a freqüência do transdutor, que será usado. Como sabemos, mudando a freqüência, quando a velocidade do som é mantida, vai resultar 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. Por outro lado a frequência (hertz, que é ciclo/segundo) depende somente da fonte emissora, que também é conhecida.

O comprimento de onda do ultra-som 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].

Segundo Marianeschi e Tili [21], não é possível ter um parecer final, uma resposta precisa que será geralmente válida, quanto ao menor defeito que pode ser detectado, por causa da influência muitas vezes complexas, de muitos fatores metalográficos e físicos. Mas é possível demonstrar que não há limite teórico para a sensibilidade em testes de ultra-som.

Sensibilidade e resolução são dois termos frequentemente utilizados na inspeção por ultra-som para descrever uma capacidade técnica para localizar falhas. A sensibilidade é entendida como a dimensão do menor defeito que pode ser detectado [21]. Sensibilidade geralmente aumenta para frequências mais altas (menores comprimentos de ondas). A resolução é a capacidade do sistema para localizar descontinuidades que estão próximas dentro do material ou perto de parte superfície. A resolução geralmente aumenta com o aumento da frequência.

A frequência de onda também pode afetar a capacidade de uma inspeção de forma adversa. Por exemplo, na inspeção com ondas superficiais, a profundidade de penetração decresce com o aumento da frequência [22]. Por isso, 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. Revestimentos Anticorrosivos

Os significantes desafios técnicos e os elevados custos diretamente relacionados com a corrosão proporcionam fortes incentivos para os engenheiros e outros profissionais técnicos para desenvolver uma firme compreensão sobre as bases fundamentais da corrosão. Compreensão dos fundamentos da corrosão é necessário não só para a identificação de mecanismos de corrosão (uma conquista significativa, por si só), mas também para prevenir a corrosão por meios adequados e para prever o comportamento de corrosão de materiais metálicos em condições de serviço. Nem a corrosão nem seu controle podem ser tratados isoladamente; o estudo de um pressupõe o estudo do outro, pois o próprio mecanismo de corrosão pode sugerir alguns modos de combate ao processo corrosivo [7, 23].

Os métodos práticos, adotados para diminuir a taxa de corrosão dos materiais metálicos, podem ser esquematizados segundo Vernon [24] da seguinte forma: *métodos baseados na modificação do processo, métodos baseados na modificação do meio*

corrosivo, métodos baseados na modificação do metal e métodos baseados nos revestimentos protetores.

Há três principais modos de proteção contra a corrosão que os revestimentos fornecem: (i) barreira de proteção; (ii) proteção catódica/sacrifício (isto é, revestimentos ricos em zinco), (iii) proteção inibitiva/passivação (isto é, revestimentos formulados com pigmentos inibidores e/ou aditivos) [25].

A corrosão pode ter consequências diretas e indiretas, sendo algumas delas de natureza econômica, tais como [7]:

Em todos os tipos de métodos citados acima, usados para controlar a corrosão, o fator econômico é primordial. Qualquer medida de proteção será vantajosa, economicamente, se o custo da manutenção baixar.

Neste projeto será dado ênfase a um único método de proteção contra a corrosão, que é através da utilização de revestimentos anticorrosivos.

2.1. Preparação de Superfície

A etapa de limpeza e preparação da superfície do substrato é, sem dúvida alguma, uma das mais importantes para que o revestimento proporcione o desempenho desejado. 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. Por exemplo, a presença de sais na superfície, sendo os mais comuns os cloretos e os sulfatos, contribui de forma substancial para a rápida degradação dos revestimentos [26, 27]. Estes sais, em sua maioria higroscópicos, aumentam a taxa de absorção de umidade da atmosfera, facilitando assim, a ocorrência de várias reações químicas ou eletroquímicas na interface metal/revestimento. Como consequência, o aparecimento de falhas prematuras é, praticamente inevitável. As falhas mais comuns (que são as utilizadas neste projeto) são empolamento da pintura, corrosão do substrato e perda de aderência dos revestimentos [7].

Portanto, como exemplificado acima, 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 ocorridos nesta etapa.

São também conhecidos os casos, e até citados na literatura especializada, 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 [7].

Pode-se, assim afirmar que não há um tratamento de preparação de superfícies metálicas de caráter universal. São inúmeras 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.

A norma mais importante no campo da preparação da superfície de aço é a norma sueca SIS 05 5900-1967 – PICTORIAL SURFACE PREPARATION STANDARDS FOR PAINTING STEEL SURFACES. Nessa norma estão especificados quatro graus de corrosão ou oxidação de superfícies de aço laminado a quente e vários graus de desoxidação ou preparação dessas superfícies para a aplicação de revestimentos. Essa norma foi elaborada pelo Instituto Sueco de Corrosão de acordo com o AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM e o STEEL STRUCTURES PAINT COUNCIL – SSPC dos Estados Unidos. Os padrões de oxidação e limpeza são apresentados na forma de ilustrações coloridas (figura 17).

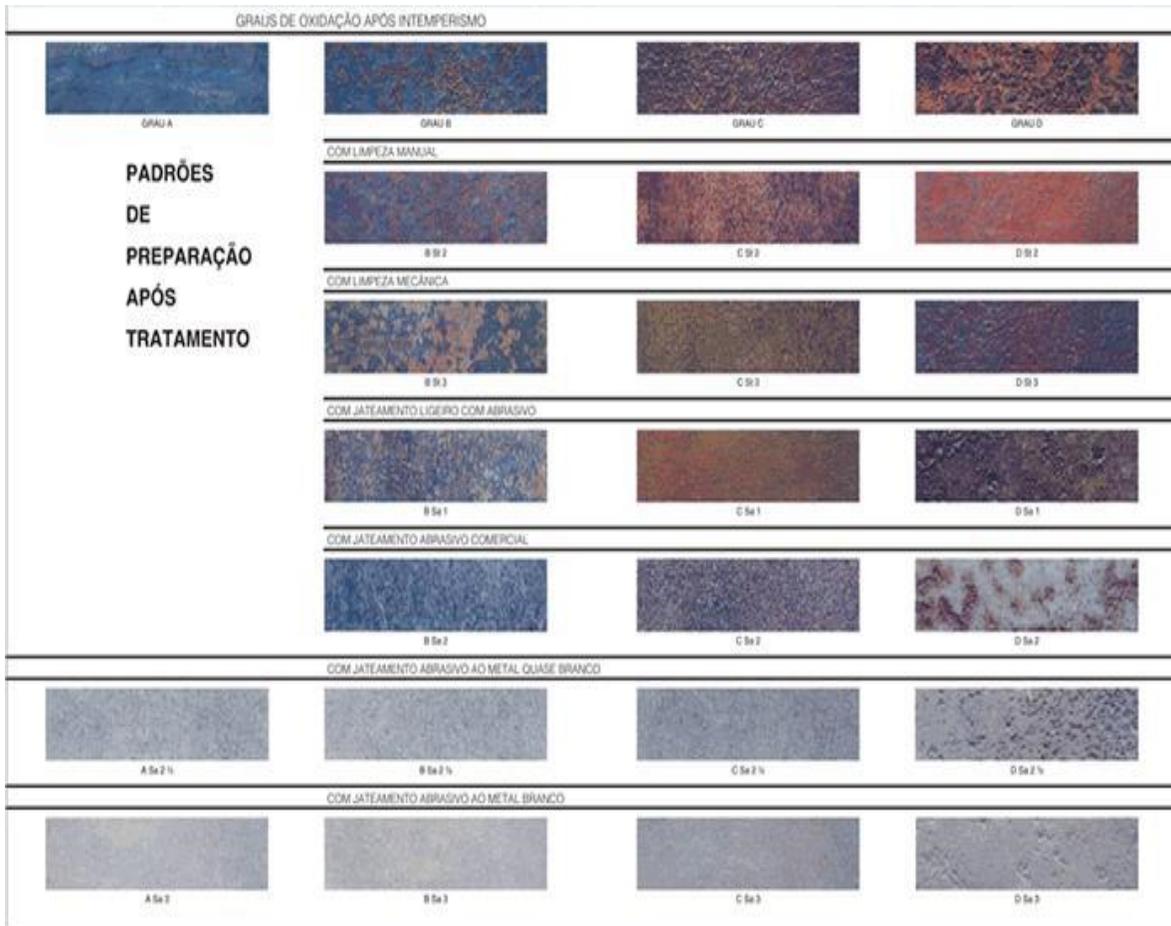


Fig. 17. Padrões visuais de preparação de superfícies de aço. Norma sueca SIS 05 5900 – 1967.

De acordo com a Norma sueca os graus de oxidação de superfícies de aço podem ser:

- ✓ **Grau A** – superfície de aço com carepa de laminação intacta e praticamente sem corrosão;
- ✓ **Grau B** – superfície de aço com princípio de corrosão, onde a carepa de laminação começa a desagregar;

- ✓ **Grau C** – superfície de aço onde a carepa de laminação foi eliminada pela corrosão ou que possa ser removida por meio de raspagem, podendo apresentar formação leve de alvéolos;
- ✓ **Grau D** – superfície de aço onde a carepa de laminação foi eliminada pela corrosão com formação de severa corrosão alveolar.

Os graus de preparação de superfícies de aço, com ferramentas mecânicas são:

- ✓ **Grau St 2** – superfície de aço tratada com ferramentas manuais ou mecânicas com remoção de carepa de laminação solta, ferrugem e tintas existentes soltas e outros contaminantes estranhos. A superfície deve ser limpa com aspirador, ar comprimido seco e limpo ou escova de pêlo. O aspecto final deve corresponder às gravuras com designação St 2. Esta limpeza não se aplica a grau de intemperismo A. Para os demais graus, os padrões de limpeza são: B St 2, C St 2 e D St 2;
- ✓ **Grau St 3** – superfície de aço tratada com ferramentas manuais ou mecânicas de maneira mais minuciosa e vigorosa que no grau St 2, devendo, após o tratamento, apresentar brilho metálico característico. Esta limpeza não se aplica a grau de intemperismo A. Para os demais graus, os padrões de limpeza são: B St 3, C St 3 e D St 3.

Como pode ser observado, este método de preparação da superfície não se aplica a superfícies de aço com grau A de oxidação (com carepa de laminação intacta) [7].

É importante destacar que a limpeza por meio de ferramentas mecânicas e ou manuais não remove completamente os produtos de corrosão da superfície, como pode ser observado pela descrição dos próprios padrões de limpeza e pela ilustração da figura 15. Como consequência, a durabilidade dos revestimentos por pintura será inferior aquela que seria obtida se os mesmos fossem aplicados sobre uma superfície com grau de limpeza melhor, tais como Sa 3, Sa 2 ½ ou Sa 2.

A limpeza com tratamento mecânico deve ser empregada em equipamentos e estruturas a serem pintados que estejam sujeitos a ambientes de baixa e média agressividade.

Graus de preparação de superfícies de aço, por meio de jateamento abrasivo:

Com relação aos graus de limpeza obtidos pelo processo de jateamento abrasivo, estes são, normalmente, avaliados com base nos padrões das normas técnicas que tratam deste tema, como, por exemplo, a SIS 05 5900-1967, a ISO 8501 e a SSPC. Estas normas prevêem quatro padrões de limpeza para superfícies de aço preparadas por meio de jateamento abrasivo [7].

- ✓ **Grau Sa 1** – conhecido como jateamento abrasivo leveiro, jateamento abrasivo leve ou jateamento abrasivo “Brushoff”. Removem-se carepa de laminação solta, ferrugem não-aderida, tinta existente solta e outros contaminantes estranhos. Após o jateamento, a superfície deve ser limpa com aspirador de pó, ar comprimido seco e limpo ou escova limpa. A aparência final deve corresponder às fotos com designação Sa 1 e esta limpeza não se aplica ao grau de intemperismo A (carepa de laminação com pouca ou nenhuma corrosão). Para os demais graus os padrões de limpeza são: B Sa 1, C Sa 1 e D Sa 1;

- ✓ **Grau Sa 2** – conhecido como jateamento abrasivo comercial. Jateamento cuidadoso a fim de remover praticamente toda a carepa de laminação, produtos de corrosão e material estranho. Caso a superfície possua cavidades (pites), apenas ligeiros resíduos poderão ser encontrados no fundo da cavidade, porém 2/3 de uma área de 1 polegada quadrada deverão estar livres de resíduos visíveis. Após o tratamento, a superfície deverá apresentar uma coloração acinzentada, aparência final deve corresponder às fotos com designação Sa 2. Este padrão não se aplica às superfícies de grau de intemperismo A. Para os demais graus os padrões de limpeza são: B Sa 2, C Sa 2 e D Sa 2.

- ✓ **Grau Sa 2 ½** - conhecido como jateamento abrasivo ao metal quase branco, em que carepa de laminação, ferrugem e material estranho são removidos de maneira tão minuciosa que a superfície apresenta leve sombreado. Em número, pode-se considerar 95% da superfície tratada ao padrão Sa 2 ½ esteja totalmente limpa e que os restantes 5% se apresentem em forma de manchas ou sombreado. Após o jateamento, a superfície deve ser limpa com aspirador de pó, ar comprimido seco e limpo ou escova limpa. A aparência final deve corresponder às fotos com designação Sa 2 ½, e os padrões de limpeza são: A Sa 2 ½, B Sa 2 ½, C Sa 2 ½ e D Sa 2 ½.

- ✓ **Grau Sa 3** – conhecido como jateamento ao metal branco, em que carepa de laminação, ferrugem e material estranho são removidos totalmente. Após o jateamento, a superfície deve ser limpa com aspirador de pó, ar comprimido seco e limpo ou escova limpa. A aparência final deve corresponder às fotos com designação Sa 3, e os padrões de limpeza são: A Sa 3, B Sa 3, C Sa 3 e D Sa 3.

Dentre os diversos métodos de limpeza de superfície por ação mecânica, o jateamento abrasivo é, sem dúvida alguma, um dos mais eficientes, tanto na remoção de contaminantes, como na formação de um perfil de ancoragem adequado para a aderência dos esquemas de pintura ao substrato metálico. Apesar de sua grande eficiência, a limpeza prévia da superfície por meio de solventes é necessária antes da execução do jateamento abrasivo, de modo a evitar a contaminação do abrasivo e da superfície [7].

O processo de jateamento consiste, basicamente, em se fazer colidir, com a superfície a ser limpa, partículas de abrasivo à alta velocidade. A projeção pode ser feita

através de ar comprimido ou por meio de força centrífuga. Na maioria dos serviços, a projeção através de ar comprimido é a forma mais utilizada.

2.2. Revestimentos Orgânicos – Tintas e Polímeros

Este tipo de revestimento será utilizado no presente trabalho. Os revestimentos orgânicos fornecem atualmente o mais difundido método de proteção [28]. A eficiência dos revestimentos protetores anticorrosivos depende do pré-tratamento da superfície do metal [29], do tipo e concentração dos pigmentos anticorrosivos [30, 31] o método de formação de filmes [32], a aderência do revestimento ao metal [33] e das propriedades mecânicas do revestimento.

Apesar da 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), conforme indicado na Tabela 4 [34]:

Tabela 4. Período de desenvolvimentos das resinas [7].

Resina	Período (década)
Alquídic	1920
Vinílica	1920
Acrílica	1930
Borracha clorada	1930
Epóxi	1940
Poliuretana	1940
Silicone	1940

Um ponto que vale a pena mencionar é que as restrições impostas pelas leis ambientais têm levado os fabricantes a desenvolver novas formulações de tintas com teores mais baixos de compostos orgânicos voláteis que, como consequência, possuem teor de sólidos mais elevado. Em função do avanço tecnológico no segmento de endurecedores para resinas epoxídicas, o mercado já dispõe de tintas líquidas isentas de solventes orgânicos, facilmente aplicáveis pelos métodos convencionais. Portanto, uma tecnologia de baixo impacto ambiental [7].

2.2.1. Constituintes das Tintas

Os principais constituintes de uma tinta líquida são aditivos, pigmentos, solventes (veículo volátil) e veículo fixo.

O veículo fixo ou não-volátil é o constituinte ligante ou aglomerante das partículas de pigmento e o responsável direto pela continuidade e formação da película de tinta. De uma forma geral, é constituído por um ou mais tipos de resina, que em sua maioria são de natureza orgânica [7].

Solventes são substâncias puras empregadas tanto para auxiliar na fabricação das tintas, na solubilização da resina e no controle de viscosidade para facilitar a aplicação [7].

Os aditivos são compostos empregados, em pequenas concentrações, nas formulações das tintas com diferentes objetivos, por exemplo: antinata, dispersante, etc. [7].

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 [7].

2.2.2. Propriedades das Tintas e Formação de Película

Como já mencionado neste trabalho, a resina é o constituinte responsável pela formação da película de tinta. Portanto, a maior parte das propriedades físico-químicas da tinta depende da natureza química da resina presente em sua composição.

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 [7].

Existem atualmente quatro tipos principais de resinas epóxi comercializadas são [35]:

- Resinas epóxi à base de bisfenol A: são as mais utilizadas, pois são versáteis e de menor custo, proveniente da reação de epícloridrina e bisfenol A, podem ser líquidas, semi-sólidas ou sólidas dependendo do peso molecular.
- Resinas epóxi à base de bisfenol F e/ou novolac: a troca do bisfenol A pelo bisfenol F propicia às resinas epóxi maior número de grupos funcionais e melhor desempenho mecânico, químico e térmico, principalmente quando curado com aminas aromáticas ou anidridos;
- Resinas epóxi bromadas: são resinas à base de epícloridrina, bisfenol A e tetrabromobisfenol A. Essas quatro moléculas adicionais de bromo conferem às resinas a característica de auto-extinguível;
- Resinas epóxi flexíveis: são resinas que possuem longas cadeias lineares substituindo os bisfenóis por poliglicóis pouco ramificados, são resinas de baixa reatividade que normalmente são utilizadas como flexibilizantes em outras resinas melhorando a resistência ao impacto com acréscimo da flexibilidade;

Nos sistemas de dois componentes, a formação do polímero entrecruzado é devida à reação entre a resina epóxi e um agente de cura que também é uma resina. A reação pode se dar a temperatura ambiente e os endurecedores mais empregados são as poliaminas e as poliamidas. São as ditas, tintas de dois componentes, nas quais a resina e o agente de cura são misturados pouco antes da aplicação.

As tintas epoxídicas curadas com aminas ou poliaminas são, em geral, produtos que apresentam melhor resistência a substâncias químicas (álcalis, ácidos, solventes) do que aquelas curadas com poliamidas. Já as tintas epoxídicas curadas com poliamidas apresentam melhor resistência a água e ambientes úmidos do que aquelas curadas com poliaminas [7].

As tintas epoxídicas curadas com poliisocianatos são produtos de elevada resistência química. Uma das tintas indicadas como condicionadora de aderência de sistemas de pintura em superfícies de aço galvanizado é formada pelo sistema de resina epóxi e poliisocianato alifático [7].

Como características gerais, as tintas epoxídicas de dois ou mais componentes apresentam excelentes propriedades mecânicas, como dureza, resistência à abrasão e ao impacto.

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. Para isso, é importante que os responsáveis por esta tarefa tenham o conhecimento adequado das características das tintas, bem como as informações a respeito das condições de trabalho da estrutura ou equipamento a ser revestido. Neste sentido, dentre os fatores básicos que norteiam a especificação de um esquema de pintura, é possível destacar:

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

2.2.3. Falhas em Revestimentos Anticorrosivos

Um revestimento pode deixar de exercer as suas funções básicas por duas razões. Sendo elas as seguintes [7]:

- 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.

Dentre as duas razões citadas, a segunda é realmente aquela que mais preocupa, pois uma falha prematura, 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). Para minimizar os riscos de ocorrência de falhas prematuras nos revestimentos por pintura, é importante considerar uma série de fatores, como por exemplo [7]:

- O projeto dos equipamentos e das estruturas metálicas – neste sentido é importante que na fase de projeto dos mesmos, sempre que possível, sejam evitados, por exemplo, locais que permitam a estagnação de água, a presença de frestas e de cantos vivos ou arestas pontiagudas;
- As condições prévias do substrato;
- A preparação da superfície;
- A especificação do esquema de pintura – é de suma importância que o esquema de pintura seja especificado para resistir às condições de trabalho e de exposição das estruturas e dos equipamentos;
- A aplicação das tintas – muitas falhas e defeitos nos revestimentos são decorrentes de uma má aplicação das tintas.
- A qualidade e as características técnicas dos produtos – de nada adianta especificar corretamente o esquema de pintura se as tintas a serem aplicadas não possuem boa qualidade;
- A realização dos serviços de manutenção – nenhum esquema de pintura é eterno. Portanto, a realização de inspeções periódicas para determinar o momento mais adequado para a realização dos serviços de manutenção é um fator extremamente importante para maximizar a durabilidade da proteção anticorrosiva.

3. Estudo de Caso

O objetivo deste capítulo é demonstrar a dificuldade em detectar falhas nos revestimentos considerados de alto desempenho pelo método convencional de inspeção visual. Esses revestimentos têm alto teor de sólidos, espessuras acima de 500µm e algumas vezes são compósitos que contêm material cerâmico

Serão relatados dois casos: i) num ensaio de imersão em ácido sulfúrico, houve uma falha no isolamento da borda de uma placa revestida e o ácido penetrou, consumindo grande parte do substrato de aço carbono. No entanto, o revestimento permaneceu íntegro; ii) foram ensaiadas amostras de aço com revestimento reforçado com fibras de vidro. Esse revestimento é feito em camadas, a saber: primer ou tinta de fundo, argamassa impregnada com manta de vidro e tinta de acabamento. Pode ocorrer a formação de bolhas entre as camadas o que facilita a permeação do meio corrosivo. Além disso, embora a espessura da camada seca seja superior a 1 cm, as propriedades de barreira da argamassa impregnada com manta de vidro não são boas. Esses defeitos resultaram em perda de aderência e corrosão do substrato, sem nenhum indício visual na superfície externa do que estava acontecendo na interface revestimento/metal.

A figura 18 mostra os corpos de prova do primeiro caso, onde houve corrosão parcial do substrato sem que o revestimento fosse danificado. Se não fosse a diferença de peso entre as amostras (amostra consumida ficou mais leve), não seria possível

detectar o problema; nem empolamento houve na camada de pintura. Esse fato ressalta a importância da utilização de técnicas de inspeção instrumentadas, pois numa simples inspeção visual o problema passaria despercebido.



Fig. 18. Amostras provenientes de ensaios de imersão em ácido sulfúrico, substrato metálico consumido por corrosão devido a uma falha de borda e o revestimento permaneceu íntegro.

No segundo caso, a solução penetrou pelo revestimento até o substrato ocasionando corrosão e perda de aderência. A corrosão só pôde ser observada após raspagem de parte do revestimento. Posteriormente as amostras foram cortadas, como ilustra a figura 19, onde se pode observar a perda de aderência.



Fig. 19. Amostras provenientes de ensaios de imersão em água de formação, substrato metálico corroído e perda de aderência.

Estas situações descritas neste capítulo mostram a necessidade da introdução de técnicas de ensaios não destrutivos na inspeção de revestimentos anticorrosivos, que permitam detectar falhas de desempenho sem que haja danos às estruturas onde os mesmos estão sendo utilizados, pois com uma simples inspeção visual não seria possível detectar tais defeitos. Esse é um problema atual, conseqüência do avanço nas formulações.

A seguir será descrita metodologia experimental desenvolvida neste projeto para investigar a possibilidade de aplicar a técnica de ultra-som na inspeção não destrutiva de revestimentos anticorrosivos.

4. Materiais e Métodos

4.1. Introdução

Como mencionado anteriormente, o objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade do ensaio por ultra-som em detectar falhas em revestimentos anticorrosivos.

Este estudo foi desenvolvido explorando-se os recursos disponíveis no simulador CIVA e buscando identificar algumas maneiras com as quais estas ferramentas contribuem na investigação de um caso real de difícil inspeção.

4.2. Corpos de Prova

Foram utilizadas amostras provenientes de ensaios em autoclaves a 150°C e 180°C, e oito amostras preparadas com defeitos controlados, ou seja, localização e dimensões conhecidas.

Os defeitos buscam simular dois tipos de falhas, que são:

1. Perda de espessura do substrato devido à corrosão localizada (6 amostras);
2. Falha de aderência entre o substrato e o revestimento (2 amostras).

Cada tipo de defeito foi reproduzido em dois diferentes tipos de revestimentos, chamados A e B.

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.

4.2.1. Perda de Espessura do Substrato

Estes defeitos buscam simular a perda de espessura localizada do substrato de aço carbono devido à corrosão.

Na figura 20, fotografias ilustram as placas de aço carbono com defeitos controlados.

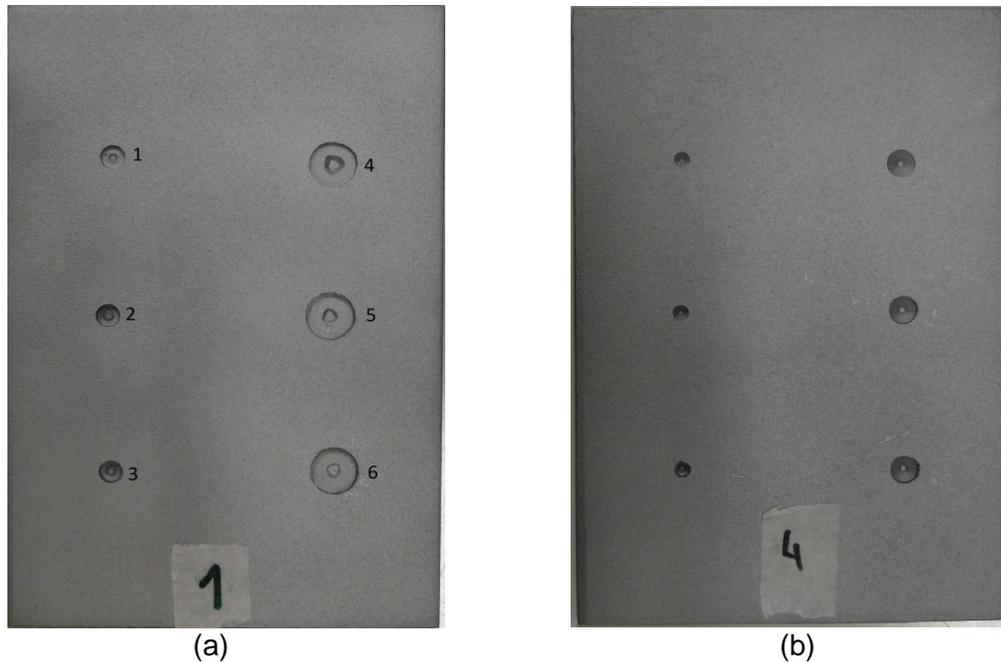


Fig. 20. Fotografias de placas de aço carbono jateadas com microesferas de vidro com furos feitos com fresa (a) e com furadeira (b).

Foram preparadas seis amostras com furos. Em uma metade das amostras os furos foram feitos com fresa e na outra metade os furos foram feitos com furadeira. Em uma amostra de cada tipo foi colocado produto de corrosão nos furos (Fe_3O_4) e posteriormente se revestiu com o revestimento A. Os furos feitos com fresa possuem o fundo paralelo à superfície do corpo de prova, enquanto os furos feitos com furadeira possuem fundo cônico. É importante destacar que a forma do furo implica diretamente nos resultados de ultra-som, pois amostras com furos cônicos apresentam maior grau de dificuldade na detecção destes defeitos se comparados as amostras com furos feitos com fresa, que possuem o fundo paralelo a superfície da chapa. Esta dificuldade está na forma com que o feixe sônico incide no defeito, nas amostras com furos cônicos o feixe incide na superfície cônica e não é refletido diretamente para o transdutor, ocasionando assim uma dificuldade na detecção destes defeitos. As dimensões dos furos são mostradas na tabela 5.

Tabela 5. Dimensões dos furos feitos com fresa e com furadeira.

Amostra 1 - Com fresa			Amostra 2 - Com fresa			Amostra 3 - Com fresa		
Furo	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Furo	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Furo	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)
1	5,45	1,5	1	5,41	1	1	5,15	1,96
2	5,25	2,3	2	5,36	1,9	2	5,2	2,21
3	5,25	2,8	3	5,26	2,37	3	5,15	2,86
4	10,75	1,5	4	11,2	1,53	4	11,04	1,88
5	11	2,15	5	11,2	1,93	5	10,96	2,14
6	10,84	2,7	6	11,24	3	6	10,85	2,73

Amostra 4 - Furadeira			Amostra 5 - Furadeira			Amostra 6 - Furadeira		
Furo	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Furo	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Furo	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)
1	3,45	1,46	1	3,33	1,46	1	3,44	1,48
2	3,4	2,7	2	3,38	2,6	2	3,41	2,56
3	3,44	3,3	3	3,4	3,8	3	3,44	2,87
4	6,35	1,46	4	6,4	1,46	4	6,35	1,48
5	6,45	2,7	5	6,38	2,6	5	6,38	2,56
6	6,43	3,3	6	6,42	3,8	6	6,4	2,87

A figura 21 mostra os corpos de prova já revestidos.

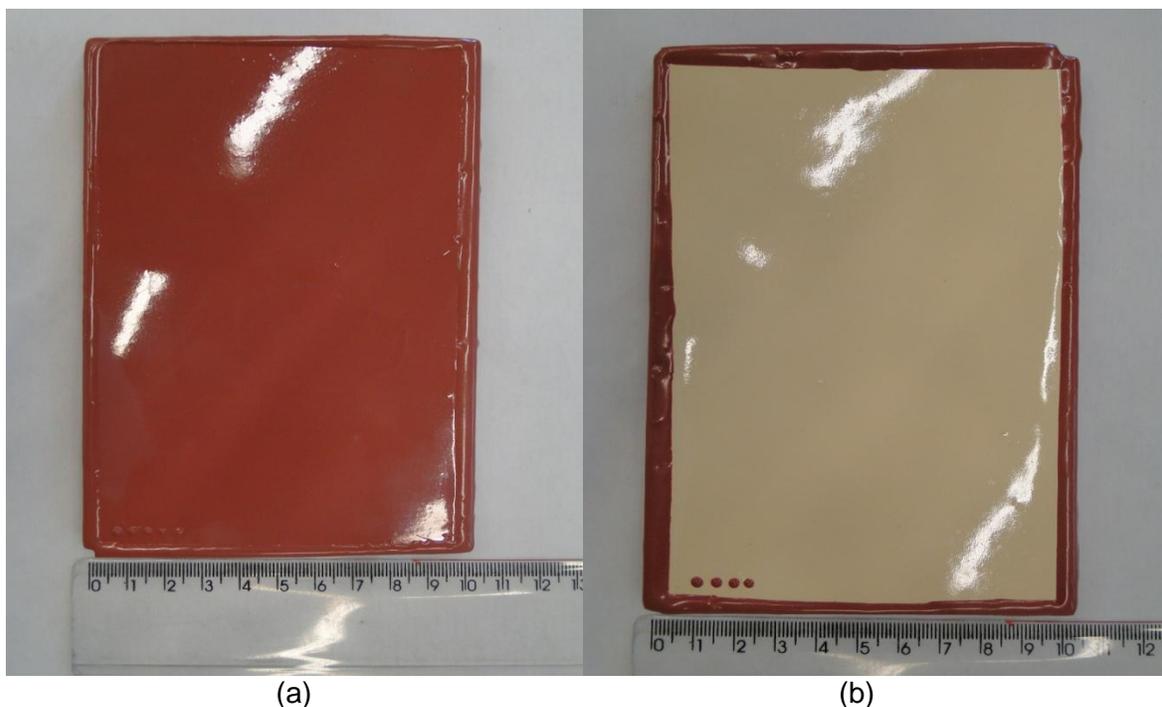


Fig. 21. Amostras revestidas com o revestimento A (a) e com o revestimento B (b), simulando perda de espessura do substrato por corrosão.

4.2.2. Falha de Aderência entre o Substrato e o Revestimento

Este tipo de defeito busca simular a falha de aderência entre o substrato de aço carbono e o revestimento.

A figura 22 mostra as chapas de aço carbono onde foram pintados quadriculados com revestimento, mantendo assim áreas com revestimento e áreas sem revestimentos. Em seguida, foi colado um filme livre (camada de revestimento, sem substrato, de espessura 500 μm aproximadamente) de cada tipo de revestimento sobre as chapas com a pintura do quadriculado ainda molhada.



Fig. 22. Amostras revestidas com o revestimento A (a) e com o revestimento B (b), simulando falha de aderência entre o substrato e o revestimento.

4.2.3. Características dos Revestimentos

As características dos revestimentos são mostradas na tabela 6.

Além do material polimérico, estes revestimentos possuem cargas inorgânicas cuja fração volumétrica na película seca será determinada por metalografia. Esse parâmetro não é conhecido por se tratar de revestimentos comerciais. No entanto, sua determinação é necessária para possibilitar as simulações computacionais que serão descritas mais adiante. A presença de cargas minerais no revestimento deve influenciar a atenuação do sinal durante a inspeção.

Tabela 6. Revestimentos e suas respectivas características.

Revestimento A	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 B	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)

4.3. Metalografia

Para que fosse determinada a fração volumétrica das cargas minerais em cada revestimento, foram feitos pequenos blocos de revestimento sem o substrato. O lixamento foi feito usando as seguintes lixas: 100, 220, 320, 400, 500, 600 e 1500. O polimento foi feito com pasta de diamante. Não foi realizado ataque químico. Em seguida, as amostras foram analisadas em um microscópio óptico (MO), modelo OLYMPUS BX 60M.

A contagem dos sólidos foi feita de acordo com a norma ASTM E 1245-03, utilizando trinta imagens capturadas com o MO. Com o software ImagePro® foi possível obter uma medida de fração volumétrica média de cargas nos revestimentos.

Esse procedimento talvez não seja o mais adequado devido à possibilidade de impregnação do material de polimento no revestimento. No entanto, para essa primeira abordagem se adotou essa metodologia que depois poderá ser melhorada com práticas mais usuais na caracterização de revestimentos orgânicos anticorrosivos.

4.4. Ultra-som

Foram utilizadas duas técnicas de ultra-som. Sendo elas ultra-som convencional e phased array.

Para o ensaio com ultra-som convencional foi utilizado um transdutor de 5 MHz e um de 15 MHz, um osciloscópio Tektronix MSO 4034 Mixed Signal, uma mesa de coordenada da empresa Kalatec Automação, o equipamento de ultra-som USN 60 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 23.

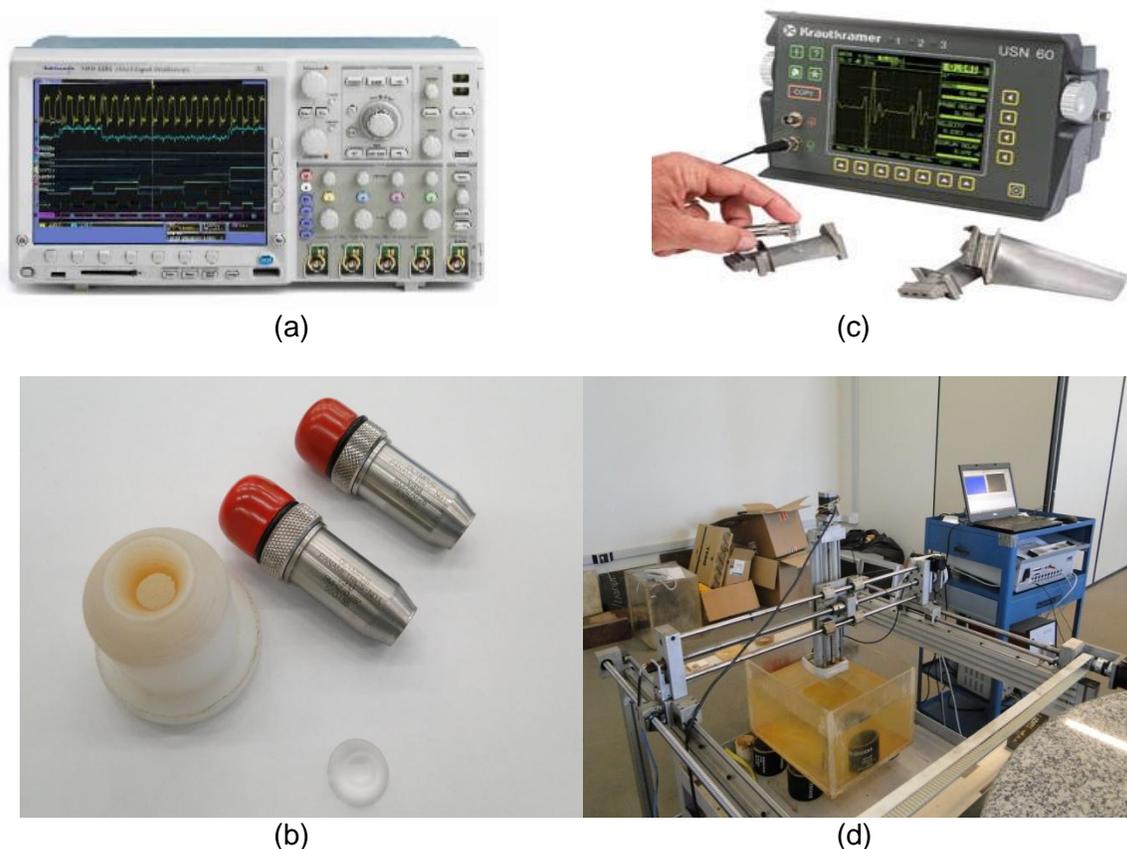


Fig. 23. Equipamentos utilizados nos ensaios por ultra-som convencional. Osciloscópio (a), transdutores e lente (b), equipamento de ultra-som USN 60 (c) e mesa de coordenada (d).

Para o ensaio com phased array foi utilizado o sistema M2M MultiX++ com sonda de 2 MHz. A figura 24 ilustra o equipamento.



Fig. 24. Equipamento M2M MultiX++ utilizado no ensaio por ultra-som phased array.

O ensaio consiste na emissão de ondas ultra-sônicas, geradas a partir da excitação do cristal piezoelétrico. A capacidade de detecção de defeitos é função do comprimento de onda que por sua vez depende da frequência do transdutor utilizado.

4.5. Simulação Computacional

Etimologicamente o verbo latino *simulare* significa imitar, indicando que o propósito da simulação é executar um modelo que imite um sistema real de modo a estudar seu comportamento [36]. Em ciências, normalmente uma simulação se refere à implementação de modelos codificados em programas computacionais, os quais são executados ao longo do tempo em diferentes condições para estudo das interações entre as partes constituintes de um sistema.

É com este propósito de imitar o mundo real para estudá-lo melhor, e em condições controladas, que os simuladores de END estão cada vez mais presentes no contexto acadêmico e industrial.

Particularizando para o caso do ultra-som, podem-se enumerar as seguintes motivações para o uso de simuladores computacionais, compiladas dos trabalhos dos autores WALL e BURCH [37], CALMON *et al.* [38] e GINZEL [39]:

- Conceber configurações de inspeção e avaliar seu desempenho a um baixo custo;
- Otimizar o plano de inspeção buscando obter cobertura total da região de interesse, com ângulos de incidência favoravelmente ajustados;
- Projetar transdutores *phased array* otimizados para aplicações específicas;
- Criar e exportar para os aparelhos as leis focais (perfil de defasagens) simuladas;
- Realizar teste virtual que avalia, ainda no estágio de concepção, a capacidade de um componente ser inspecionado;
- Auxiliar na visualização e compreensão dos resultados de inspeção;

Diversos simuladores computacionais de ultra-som têm sido desenvolvidos pela comunidade internacional de END. O simulador computacional CIVA escolhido para este

trabalho está entre os melhores pacotes comerciais utilizados no ramo de END na atualidade, foi desenvolvido pela Comissão de Energia Atômica da França.

Este software vem apresentando excelentes resultados nas edições mais recentes das competições promovidas anualmente desde 2004 pela WFNDEC (*World Federation of Non Destructive Evaluation Centers*), chamadas de *Benchmarks*, quando é avaliada a capacidade dos simuladores em reproduzir condições experimentais extremas. O programa CIVA reúne atualmente em sua plataforma especialista a capacidade de simular três métodos distintos de END: ultra-som, correntes parasitas e radiografia.

As ferramentas de simulação de ultra-som incluem a propagação do feixe e sua interação com defeitos ou a própria peça (eco de fundo, eco de superfície, efeitos de borda e sombreamento) e a posterior recepção pelo transdutor. Elas permitem a simulação de um processo completo de inspeção com um amplo espectro de transdutores, peças e defeitos.

Para iniciar a simulação é preciso definir os parâmetros de configuração, que incluem a especificação dos seguintes itens: transdutor, peça, material e defeito.

5. Resultados e Discussão

5.1. Análise Metalográfica e Contagem de Sólidos

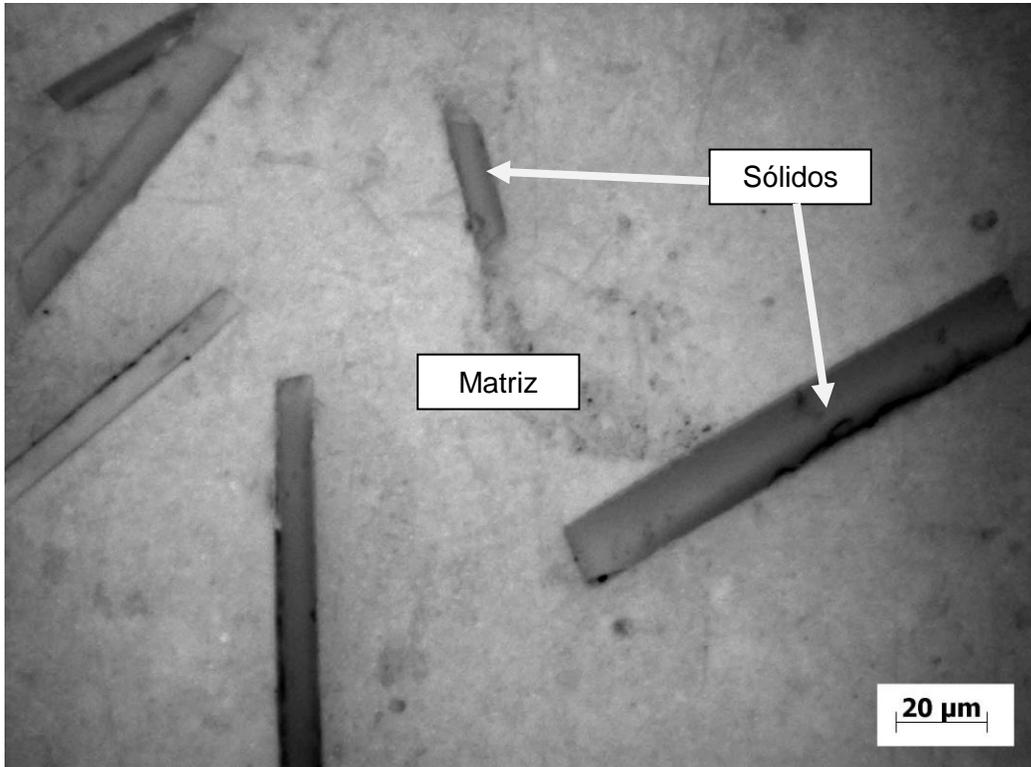
Neste tópico será apresentada apenas uma micrografia de cada amostra, pois não há necessidade de reproduzir todas as trinta imagens que foram utilizadas na contagem.

Foi utilizado um bloco de revestimento, sendo ele do revestimento B, neste bloco foram feitos dois cortes, um transversal e outro longitudinal, resultando em duas amostras. O bloco do revestimento utilizado está ilustrado na figura 25.

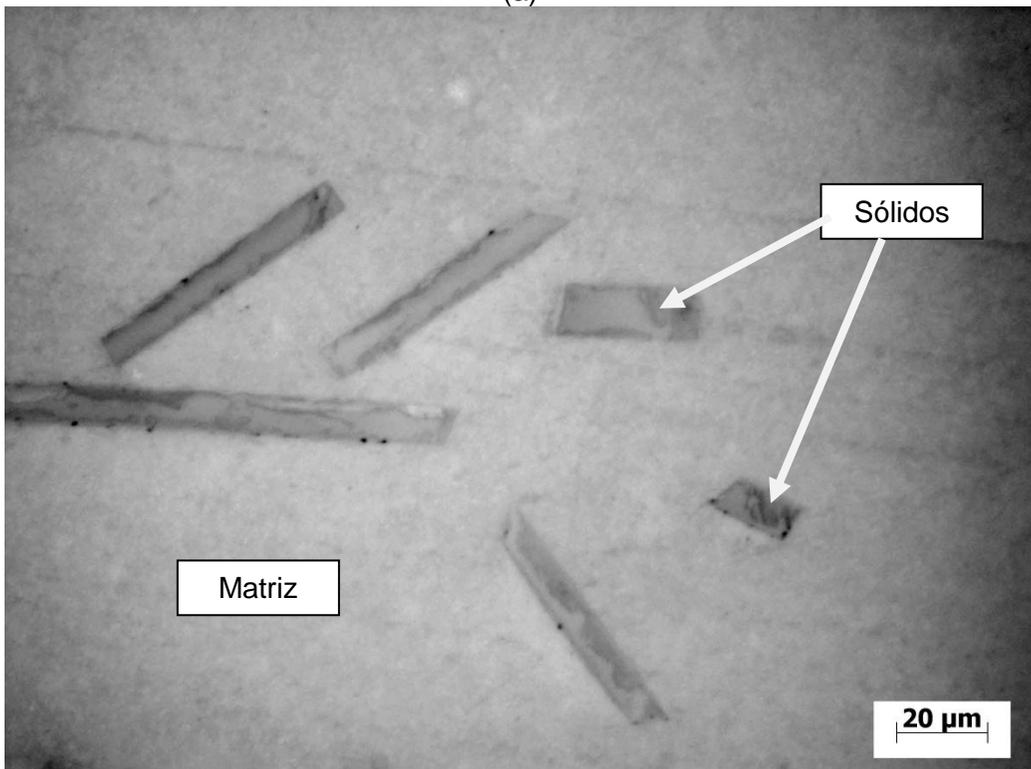


Fig. 25. Bloco de revestimento B.

A figura 26 mostra a microestrutura característica do revestimento B, CP1 (corte transversal) e CP2 (corte longitudinal), respectivamente.



(a)



(b)

Fig. 26. Microestrutura característica do revestimento B. Corte transversal (a) e longitudinal (b).

Pode-se observar que a microestrutura é composta da matriz polimérica e de estruturas colunares de vidro. Ambas as imagens possuem aumento de 500 vezes.

Tabela 7. Resultado da fração volumétrica de sólidos em corte transversal.

IMAGEM	ÁREA TOTAL	ÁREA DESEJADA	FRAÇÃO VOLUMÉTRICA
1	12027,58	1191,704	9,908094
2	12027,58	818,8262	6,807905
3	12027,58	1627,34	13,53007
4	12027,58	564,6661	4,694761
5	12027,58	1015,723	8,444947
6	12027,58	432,7617	3,598078
7	12027,58	2113,127	17,56901
8	12027,58	636,4328	5,291445
9	12027,58	448,1463	3,725989
10	12027,58	2186,692	18,18065
11	12027,58	1815,119	15,09131
12	12027,58	957,8674	7,963924
13	12027,58	1222,497	10,16412
14	12027,58	1606,944	13,36049
15	12027,58	2121,978	17,6426
16	12027,58	3347,059	27,8282
17	12027,58	1376,295	11,44283
18	12027,58	1322,159	10,99273
19	12027,58	1569,098	13,04583
20	12027,58	1128,922	9,386108
21	12027,58	1434,947	11,93047
22	12027,58	1442,954	11,99704
23	12027,58	1212,136	10,07797
24	12027,58	1046,915	8,704284
25	12027,58	1299,674	10,80578
26	12027,58	1705,422	14,17926
27	12027,58	2051,962	17,06047
28	12027,58	1622,896	13,49312
29	12027,58	1075,885	8,945145
30	12027,58	1693,346	14,07886
		MÉDIA=	11,99348
		DES. PADRÃO=	2,949177

Tabela 8. Resultado da fração volumétrica de sólidos em corte longitudinal.

IMAGEM	ÁREA TOTAL	ÁREA DESEJADA	FRAÇÃO VOLUMÉTRICA
1	12027,58	1207,809	10,042
2	12027,58	473,0875	3,933356
3	12027,58	1266,445	10,52951
4	12027,58	800,4334	6,654983
5	12027,58	1930,361	16,04945
6	12027,58	1770,226	14,71805
7	12027,58	1658,333	13,78775
8	12027,58	1557,021	12,94542
9	12027,58	1320,423	10,97829
10	12027,58	1280,952	10,65012
11	12027,58	1659,911	13,80088
12	12027,58	2320,073	19,28961
13	12027,58	1211,139	10,06968
14	12027,58	664,6169	5,525774
15	12027,58	1465,875	12,18761
16	12027,58	1689,945	14,05058
17	12027,58	672,8541	5,59426
18	12027,58	1138,4	9,464912
19	12027,58	1726,332	14,35311
20	12027,58	905,7496	7,530606
21	12027,58	1189,679	9,891257
22	12027,58	954,1035	7,93263
23	12027,58	1452,37	12,07533
24	12027,58	1819,485	15,1276
25	12027,58	1589,346	13,21418
26	12027,58	1695,244	14,09464
27	12027,58	961,4514	7,993722
28	12027,58	1990,938	16,55311
29	12027,58	526,6248	4,378477
30	12027,58	1595,293	13,26362
MÉDIA=			11,65281
DES. PADRÃO =			2,278033

A determinação da fração volumétrica de carga é importante para a realização da simulação computacional, pois é um dos parâmetros de entrada. Como os revestimentos apresentaram desempenho semelhante durante a inspeção ultra-sônica, a simulação só foi realizada apenas para um deles, revestimento B.

5.2. Simulação com CIVA

O software de simulação computacional CIVA, desenvolvido pela Comissão de Energia Atômica da França, foi utilizado para buscar os melhores parâmetros ultrassônicos a fim de se obter a detecção de defeitos abaixo da camada de revestimento anticorrosivo aplicados aos corpos de prova.

5.2.1. Corpos de Prova com Defeitos Conhecidos

Para fins de ganho em tempo de simulação computacional apenas a situação mais difícil em termos de detecção foi simulada. Ou seja, foi simulado a inspeção apenas no furo de 5 milímetros de diâmetro e 2 milímetros de profundidade, em outras palavras o furo menor e menos profundo das amostras feitas com fresa.

Para tal avaliação, a priori, foram utilizados como corpos de prova dois corpos de prova com defeitos controlados que foram descritos no capítulo 4 de maneira a permitir o ajuste dos parâmetros de ensaio.

Nas figuras 27 e 28 podemos observar os desenhos esquemáticos dos corpos de prova fabricados em primeiro momento.

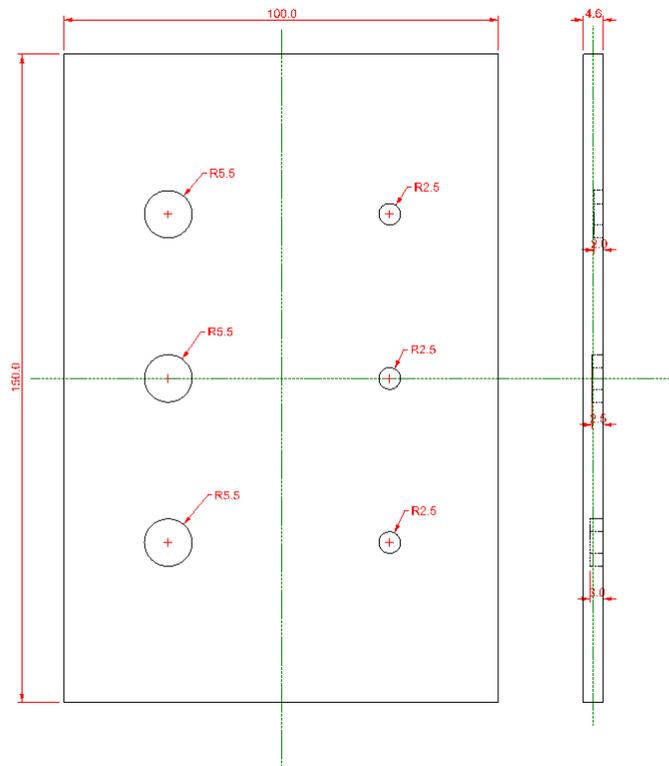


Fig. 27. Corpo de prova 1: Chapa de aço carbono e dimensões em milímetros.

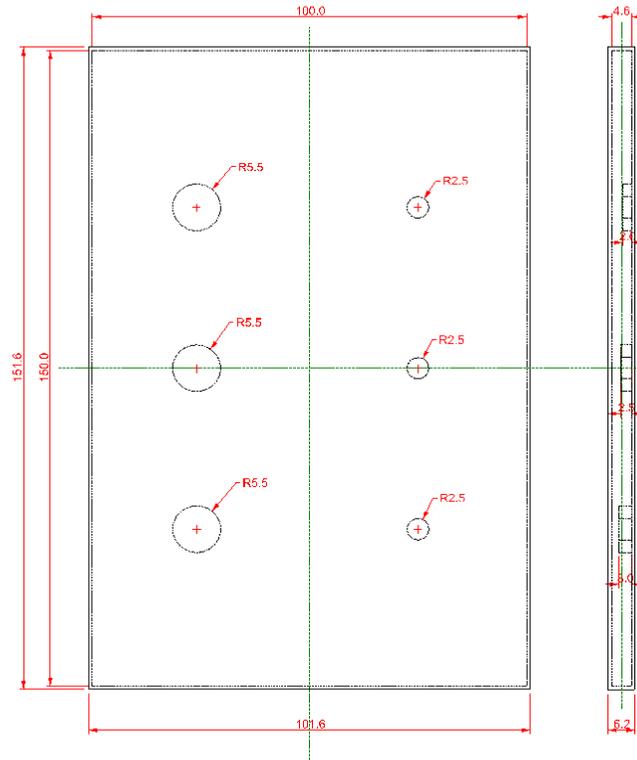


Fig. 28. Corpo de prova 2: Chapa de aço carbono revestida com o compósito e dimensões em milímetros.

Ambos os corpos de prova foram reproduzidos em ambiente virtual para que a simulação computacional pudesse ser concretizada.

A figura a seguir mostra a escala de cores característica do CIVA e a amplitude correspondente.

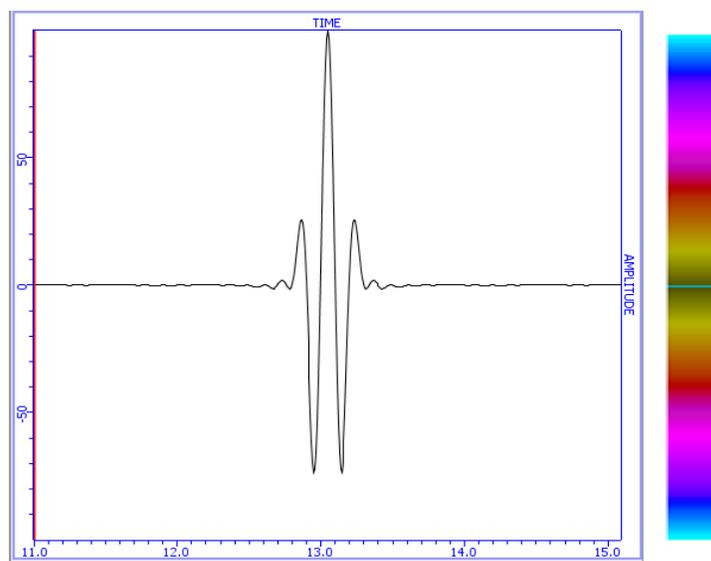


Fig. 29. Escala de cores característica do CIVA e a amplitude correspondente.

Foram simuladas no ambiente do software CIVA as seguintes situações:

- I. Corpo de prova 1, simulando inspeção por imersão com transdutor convencional de frequência na faixa de 15 MHz, não focado.

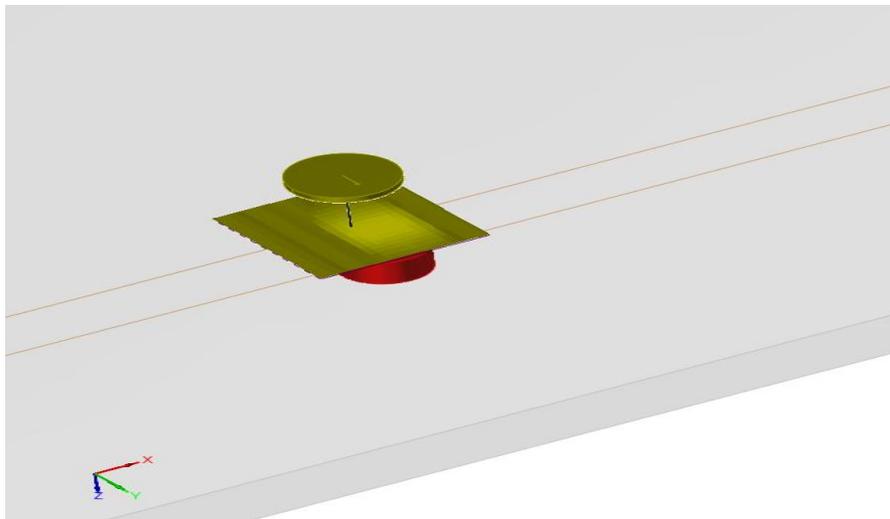
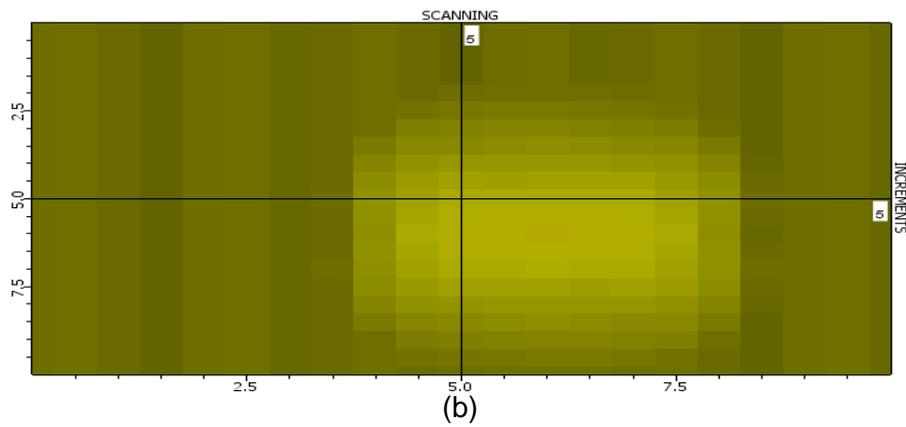
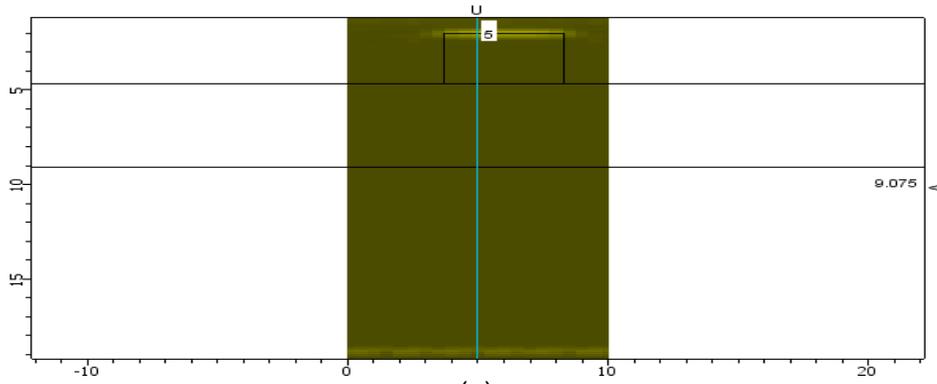
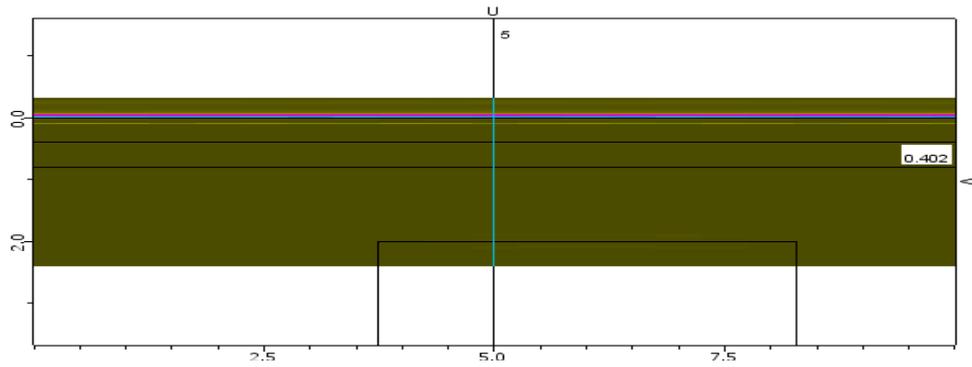


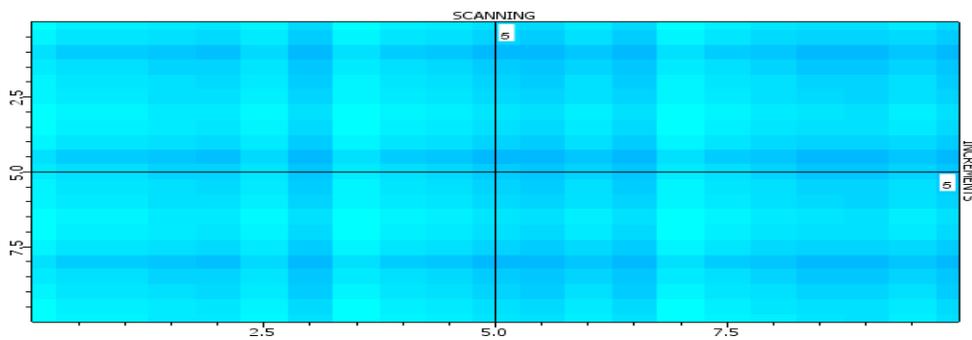
Fig. 30. Resultados da simulação com CIVA (situação I), para transdutor de 15 MHz e não focado, exibidos em B-scan (a), C-scan (b) e C-scan 3D (c).

Na condição da figura 30 foi possível detectar o defeito, mas não há uma boa resolução em termos de sinal.

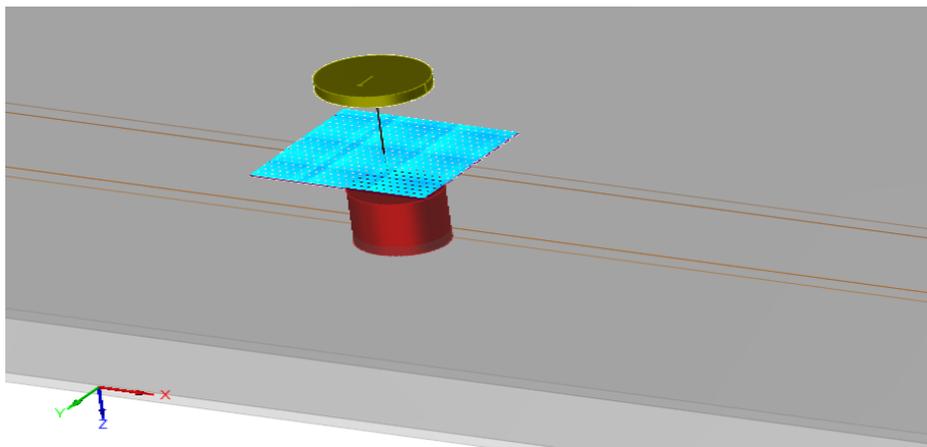
- II. Corpo de prova 2, simulando inspeção por imersão com transdutor convencional de frequência na faixa de 15 MHz, não focado.



(a)



(b)



(c)

Fig. 31. Resultados da simulação com CIVA (situação II), para transdutor de 15 MHz e não focado, exibidos em B-scan (a), C-scan (b) e C-scan 3D (c).

Como pode ser visto na figura 31, para esta situação II, não foi possível detectar o defeito. Esta situação se assemelha a encontrada na prática, como poderá ser visto mais adiante neste trabalho.

- III. Corpo de prova 2, simulação computacional de inspeção por imersão com transdutor focado de cristal esférico e côncavo de 15 MHz, com raio da curvatura do cristal de 200mm, e o foco se forma a 15mm de distância do ponto de saída do feixe.

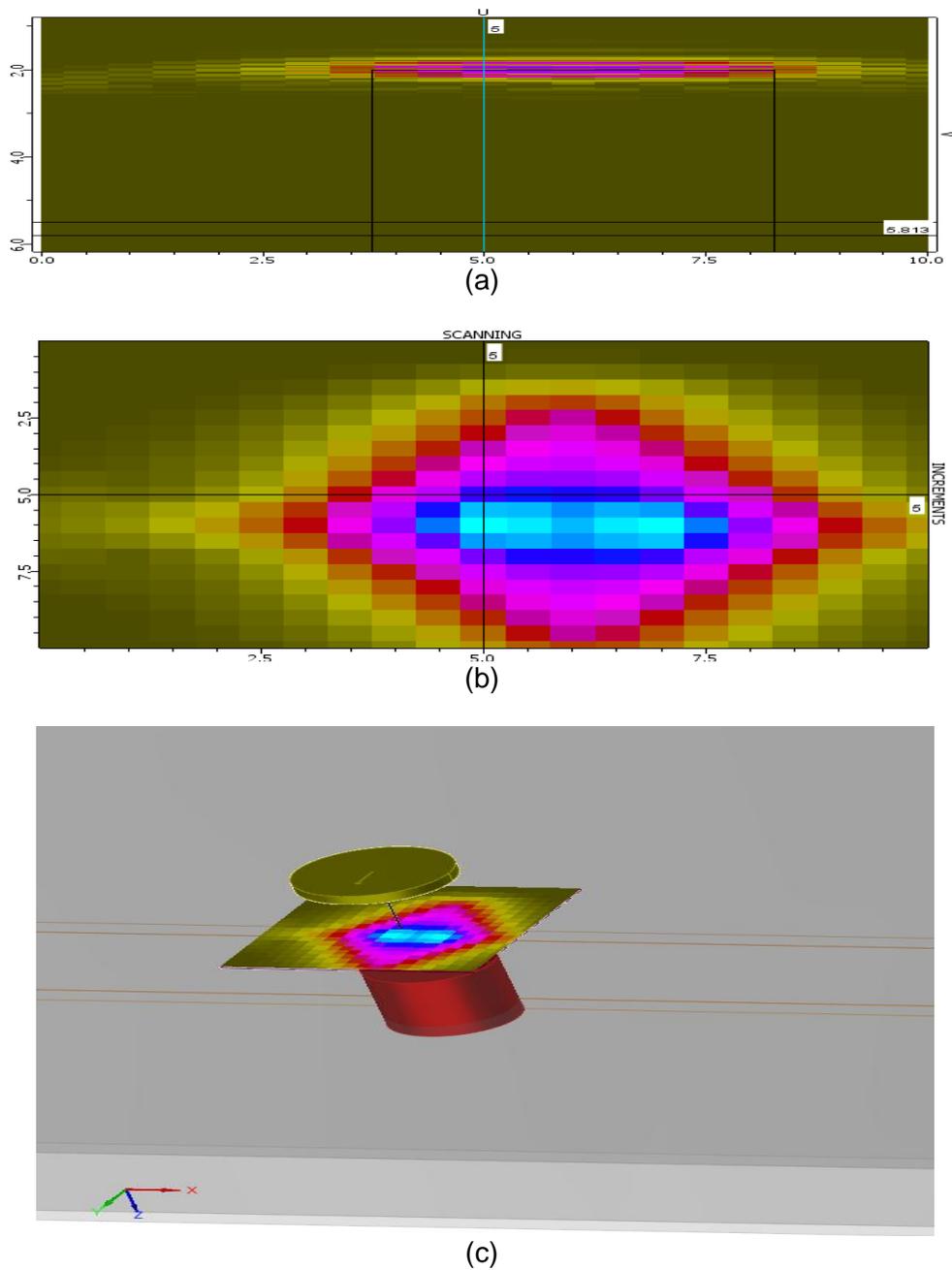
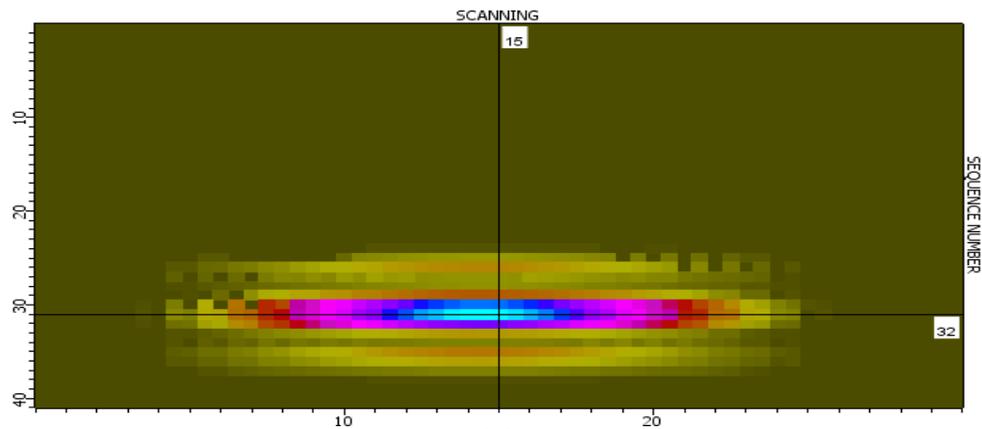


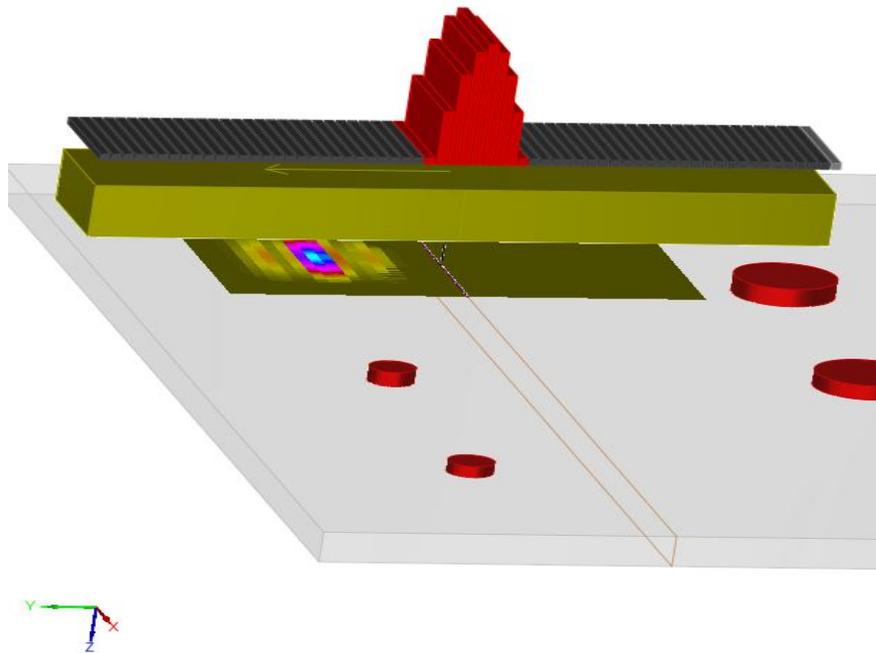
Fig. 32. Resultados da simulação com CIVA (situação III), para transdutor de 15 MHz e focado, exibidos em B-scan (a), C-scan (b) e C-scan 3D (c).

Na situação III (figura 32) foi possível detectar os defeitos e com boa resolução devido às características do transdutor côncavo. Em outras palavras, a focalização proporcionou a melhor resolução.

- IV. Corpo de prova 1, simulando inspeção por imersão com cabeçote phased array linear e de frequência na faixa de 2 MHz.



(a)



(b)

Fig. 33. Resultados da simulação com CIVA (situação IV), para phased array de 2 MHz, exibidos em C-scan (a) e C-scan 3D (b).

Na situação IV (figura 33) também foi possível detectar o defeito com boa resolução.

V. Corpo de prova 2, simulando inspeção por imersão com cabeçote phased array linear e de frequência na faixa de 2 MHz.

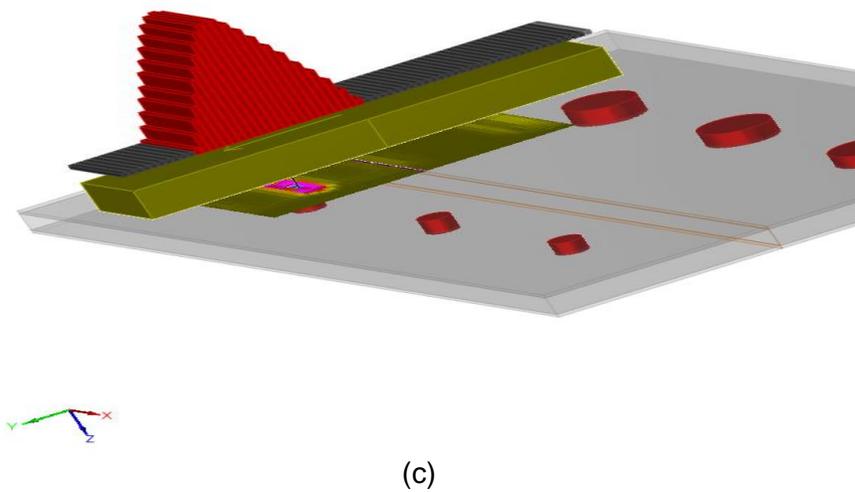
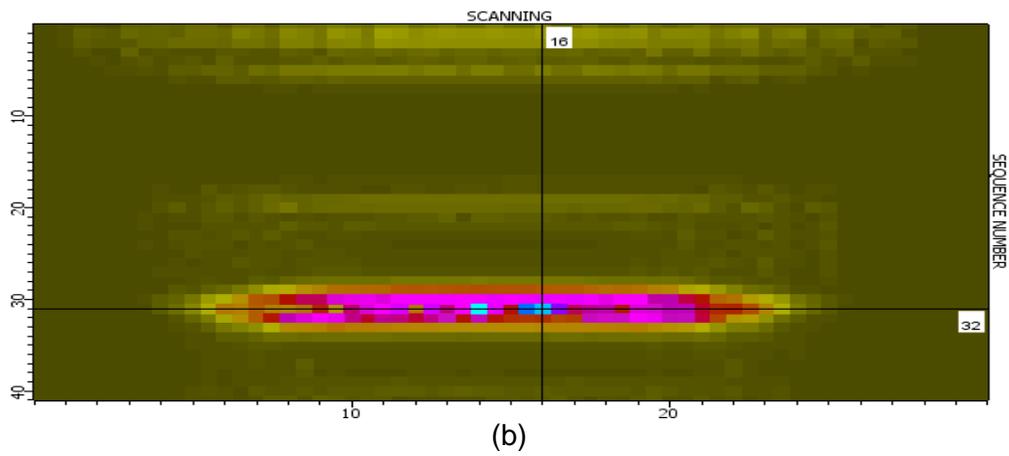
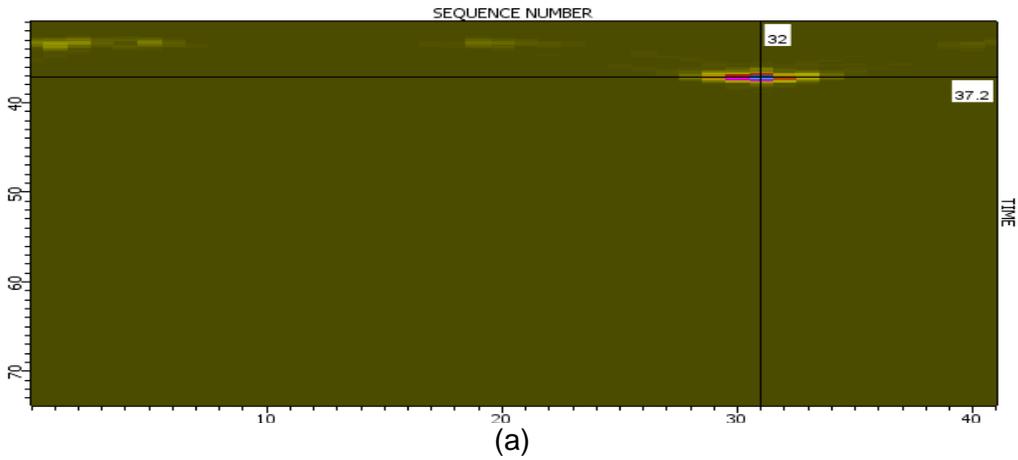


Fig. 34. Resultados da simulação com CIVA (situação V), para phased array de 2 MHz, exibidos em B-scan (a), C-scan (b) e C-scan 3D (c).

Na situação V (figura 34) foi possível detectar o defeito e com boa resolução. A forma de excitação dos elementos mostrada na figura 34 (c) faz com que o feixe sônico seja focado, o que facilita a inspeção e proporciona uma melhor resolução.

Outra simulação realizada foi em relação ao feixe sônico. Neste caso, duas situações foram simuladas: a primeira onde o feixe sônico não é focado (figura 35) e a segunda onde o feixe sônico é focado (figura 36).

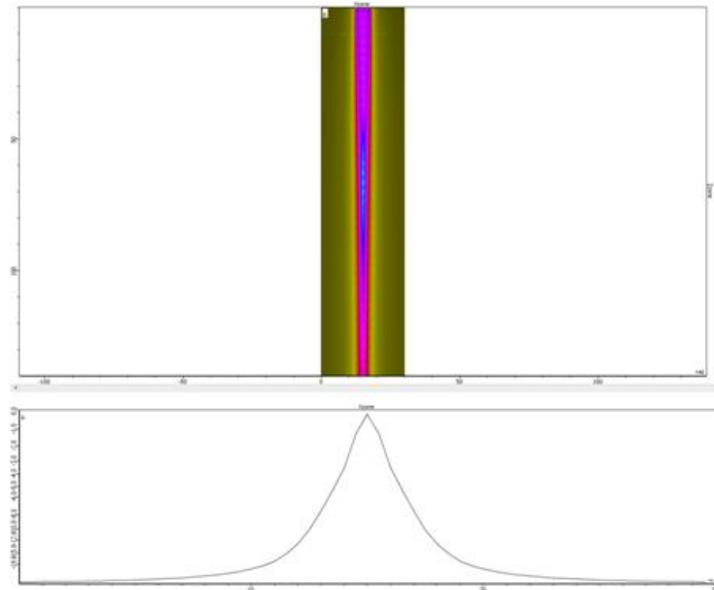


Fig. 35. Simulação do feixe sônico de um cabeçote normal de frequência na faixa de 15 MHz.

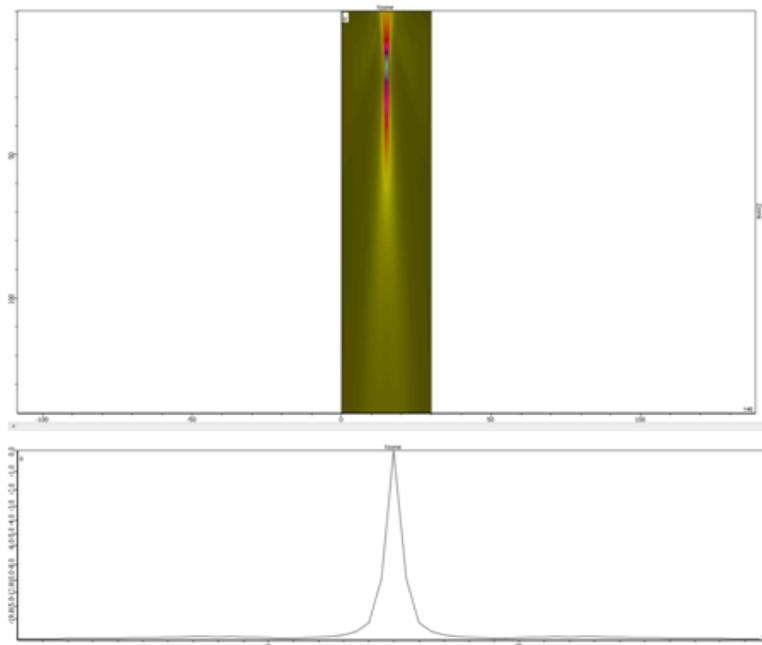


Fig. 36. Simulação do feixe sônico de um cabeçote normal côncavo com raio de 16mm e de frequência na faixa de 15 MHz.

Nas figuras 35 e 36, a parte superior mostra o feixe sônico em um gráfico distância (mm) x distância (mm) e a parte inferior mostra o perfil do feixe sônico no ponto de máxima amplitude em um gráfico distância (mm) x amplitude.

Como se pode observar nas figuras 35 e 36, o feixe sônico focado concentra mais energia o que facilita a inspeção em revestimentos orgânicos onde o material é muito atenuante.

A simulação computacional por meio do software CIVA permite que seja observada qual a resposta da inspeção em termos de detecção de defeitos sob um revestimento anticorrosivo; este é o objetivo do estudo em questão. No entanto, para tal simulação o software CIVA exige alguns parâmetros de entrada que são indispensáveis para que possamos caracterizar o revestimento virtualmente.

São estes parâmetros:

- ✓ Velocidade sônica do material – a velocidade foi estimada como sendo de 2000 m/s. Ela foi medida numa amostra de 10 mm de espessura do revestimento B inspecionado por ensaio de contato e frequência de 2 MHz. Essa foi a frequência que mostrou o melhor resultado devido ao fato do material ser bastante atenuante. Com a frequência de 2 MHz é possível se observar mais ecos de repetição da espessura do que com as frequências de 5 MHz e 7 MHz;
- ✓ Atenuação sônica – a atenuação é cerca de 1.2 db/mm
- ✓ Fração volumétrica da carga com relação à matriz do compósito – o resultado da fração volumétrica foi mostrado no item 5.1.
- ✓ Espessura do revestimento – a espessura do revestimento é de aproximadamente 500 μm .

5.3. Rotina em Matlab

As imagens exibidas no item 5.4.1 para inspeção realizada com ultra-som convencional foram geradas a partir da rotina em MATLAB mostrada no anexo.

5.4. Inspeção Ultra-sônica em Amostras com Defeitos Controlados

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados da inspeção com ultra-som convencional e phased array nas amostras com defeitos introduzidos propositalmente de maneira controlada.

5.4.1. Ultra-som Convencional

Como visto na simulação, a utilização de transdutores focados são melhores do que os não focados, pois concentra o feixe sônico para aumentar a sensibilidade à detecção de defeitos.

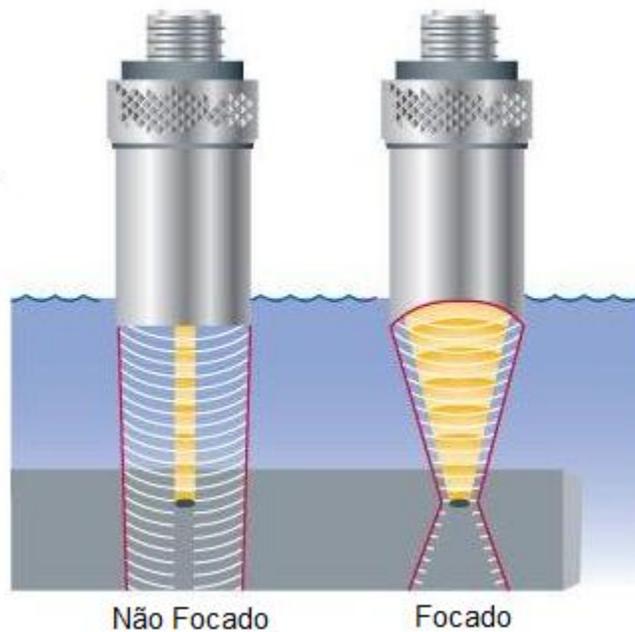
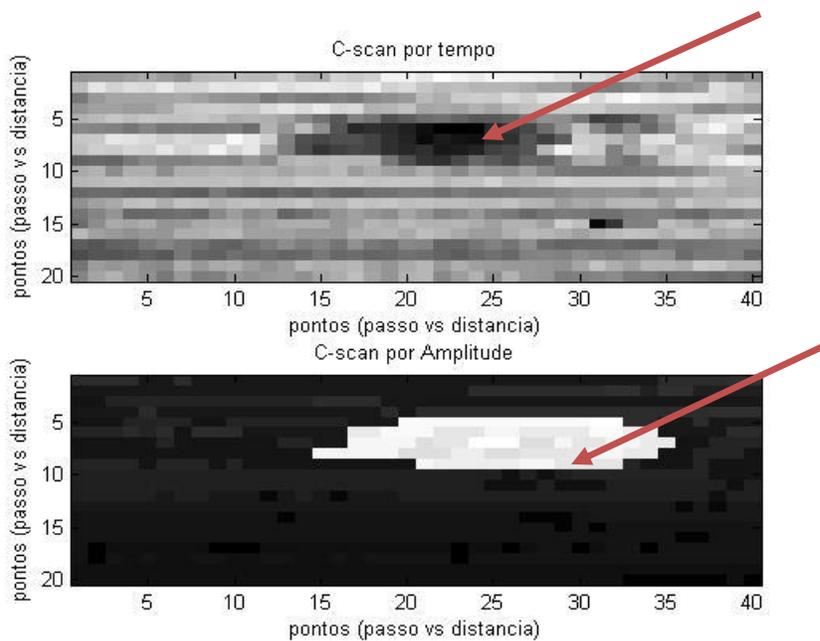


Fig. 37. Feixe sônico dos transdutores não focado e focado.

A figura 37 ilustra o feixe sônico de um transdutor não focado e de um focado.

Primeiramente, foram realizadas inspeções na chapa de aço carbono, com defeitos feitos com fresa e sem revestimento, com transdutores de 5 e 15 MHz (focados). Abaixo serão apresentados os resultados com os transdutores de 5 e 15 MHz.

Transdutor de 5 MHz



(a)

Transdutor de 15 MHz

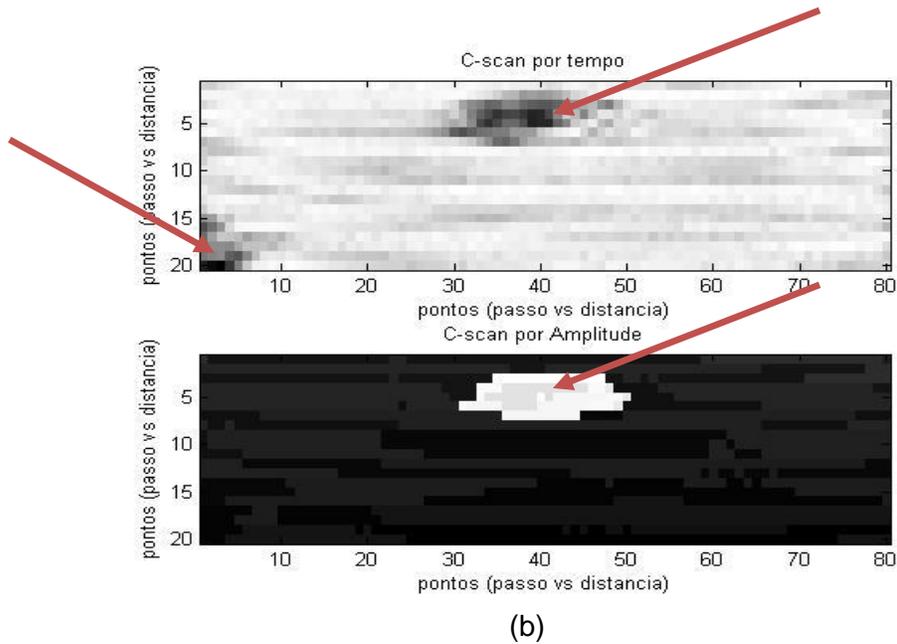
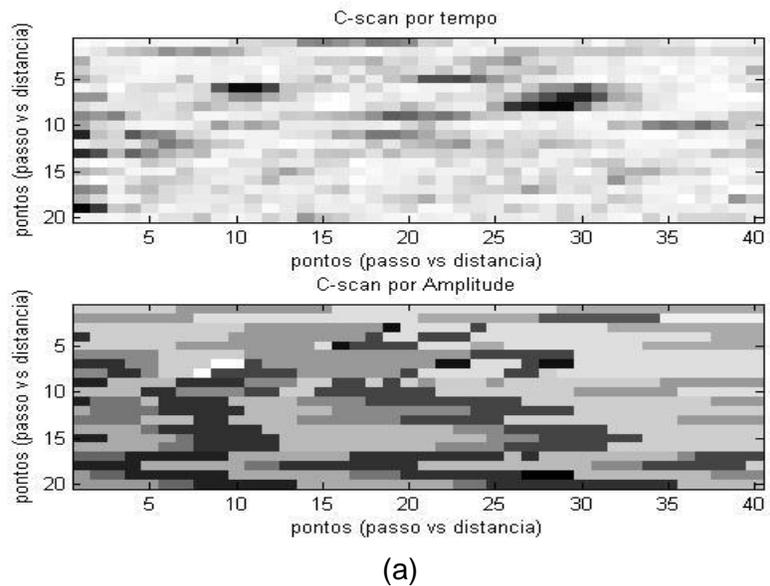


Fig. 38. Resultado da inspeção realizada na chapa de aço carbono com transdutores de 5 (a) e 15 MHz (b) com lente.

Nas imagens C-scan mostradas (figura 38) pode-se ver claramente a região do defeito indicada pelas setas, tanto no transdutor de 5 MHz, quanto no de 15 MHz.

Posteriormente, foram realizadas as inspeções na chapa de aço revestida, com revestimento B.

Transdutor de 5 MHz



Transdutor de 15 MHz

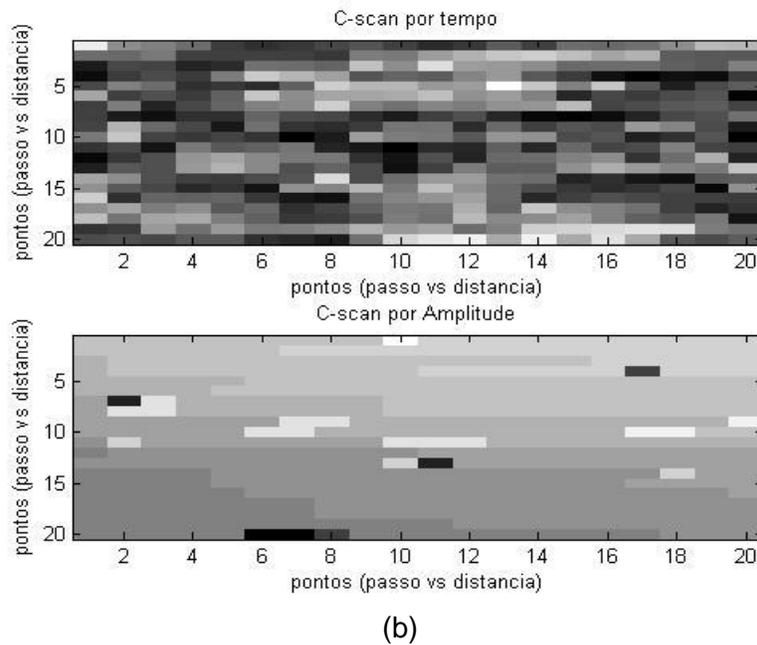


Fig. 39. Resultado da inspeção realizada na chapa de aço carbono revestida com transdutores de 5 (a) e 15 MHz (b) com lente.

Para as inspeções realizadas com a chapa revestida com o revestimento B, não é possível afirmar com clareza a região do defeito.

A imagem realizada com o transdutor de 5 MHz (figura 39 (a)) é mais indicativa do que a realizada com 15 MHz (figura 39 (b)), isto se deve ao material (revestimento) ser muito atenuante, o que dificulta a inspeção com transdutores de maior frequência (menor comprimento de onda).

5.4.2. Phased Array

O ultra-som phased array foi utilizado para detectar os defeitos inseridos em um corpo de prova contido em material de revestimento compósito.

Por meio de uma variação temporal na excitação dos sensores de phased array é possível criar uma focalização em determinado ponto de interesse.

Este artifício de focalização provocado por defasagem no tempo de excitação em teoria melhora o resultado de dimensionamento dos defeitos, devido ao fato de toda energia da onda ficar concentrada na região especificada pelo operador.

O esquema da figura 40, mostra como foi posicionado o transdutor e o corpo de prova para a realização do ensaio.

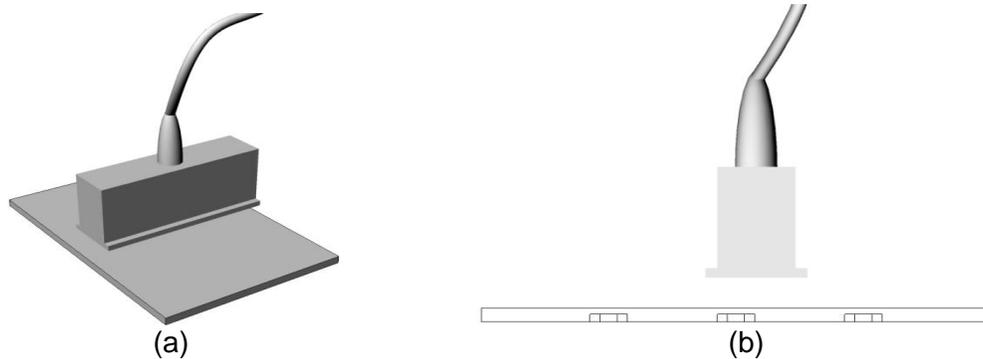


Fig. 40. Desenho esquemático da montagem do ensaio. O ensaio em perspectiva (a) e o ensaio em vista lateral (b), em que se pode observar que o ensaio foi realizado no lado oposto aos furos.

Os resultados da inspeção com phased array serão mostrados apenas na forma de B-scan e C-scan.

Foi utilizada uma lei focal de acordo com os parâmetros observados na Tabela 9 para inspeção. Os parâmetros de lei focal utilizados, tanto para amostras com defeitos controlados quanto em amostras provenientes de ensaios de corrosão em autoclave, foram selecionados num processo de tentativa e erro, aqueles que melhor se adaptaram as condições de ensaio é que foram escolhidos.

Tabela 9. Parâmetros de lei focal phased array

Primeiro elemento da seqüência	1
Números de elementos de transmissão em seqüência	23
Números de elementos de recepção em seqüência	23
Número de passos em seqüência	42
Função	“Simple Electronic Scanning”
Varredura da lei focal	“Simple sweep”
Ponto focal	Ao longo da superfície
Tipo de lei	“Multi-points focusing”
Cabeçote	PA Linear Imasonic / 64 elementos
Frequência	2 MHz
Acoplamento	Água / Imersão

Primeiramente serão exibidos os resultados da inspeção na chapa de aço carbono com defeitos de fresa e sem revestimento.

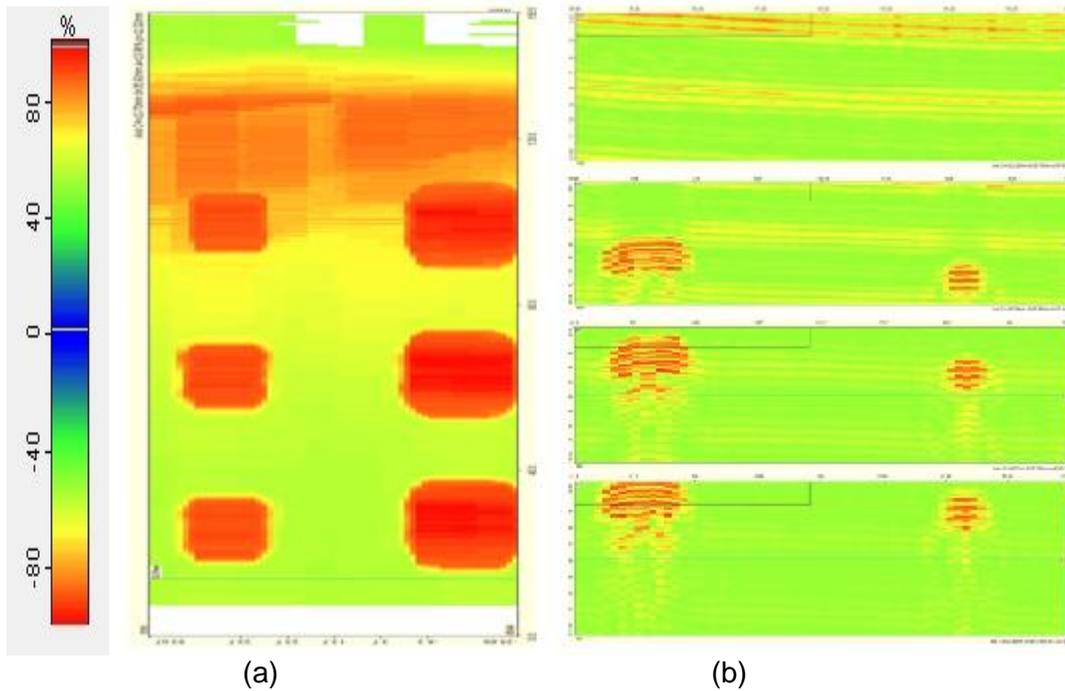


Fig. 41. Resultado da inspeção com phased array na chapa de aço carbono com defeitos controlados e sem revetimento, na freqüência de 2MHz. C-scan (a) e B-scan (b).

Assim como na simulação, na inspeção com phased array na freqüência de 2 MHz foi possível ver claramente a região com defeito (figura 41). O nível zero da escala de

cores representa o nível zero de amplitude no A-scan. O máximo e o mínimo da escala representam respectivamente o máximo e o mínimo de amplitude no A-scan.

A figura 42 mostra a inspeção feita no revestimento A. Nesta situação também foi possível detectar os defeitos, tanto os furos maiores quanto os furos menores.

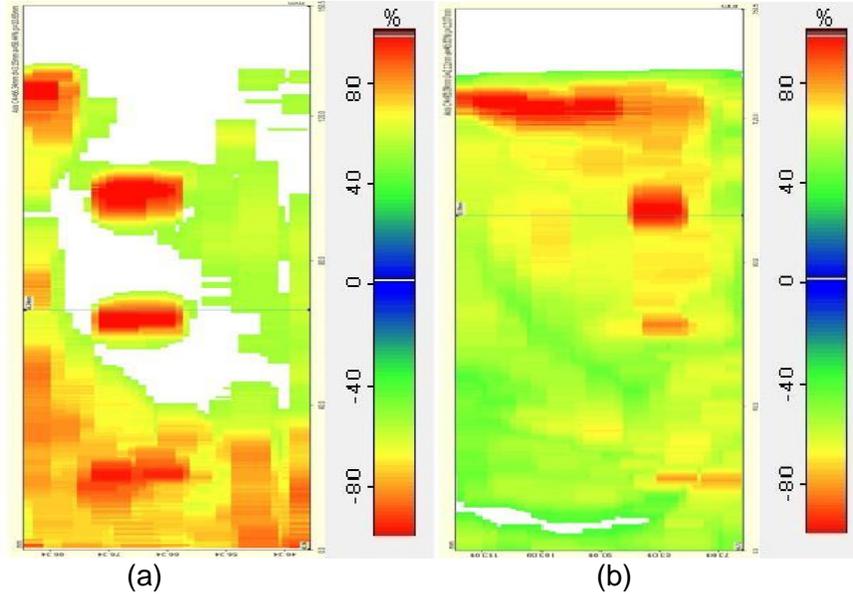


Fig. 42. Inspeção realizada no revestimento A com phased array de 2 MHz de frequência, resultados exibidos na forma C-scan para os furos maiores (a) e os furos menores (b).

A figura 43, mostra o resultado da inspeção realizada com phased array também na frequência de 2 MHz, para o revestimento B. É possível observar claramente as regiões com defeitos.

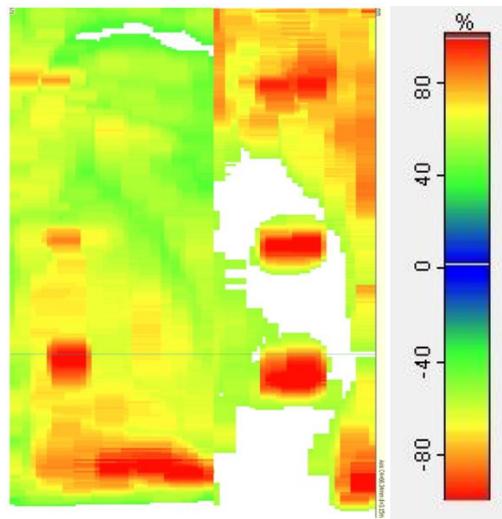


Fig. 43. Inspeção realizada no revestimento B com phased array de 2 MHz de frequência, resultados exibidos em C-scan.

A figura 44 mostra o resultado da inspeção realizada com phased array de 2 MHz de frequência no revestimento A com furos realizados com furadeira (cônicos) no substrato de aço carbono.

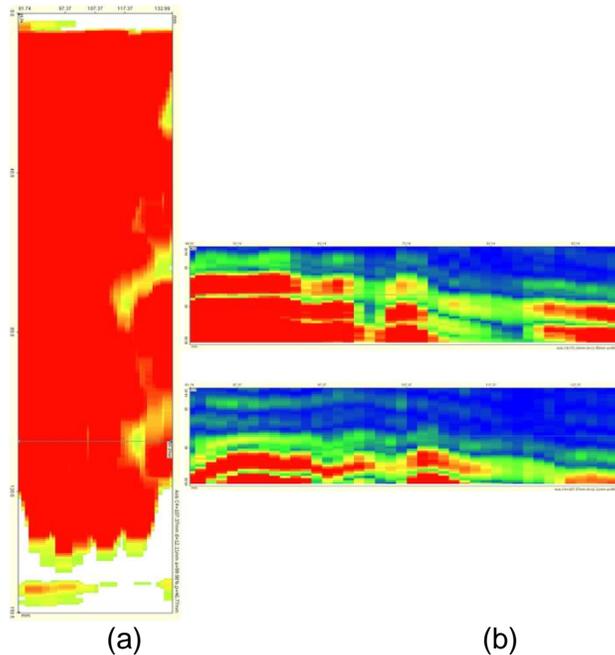


Fig. 44. Resultado da inspeção realizada com phased array 2MHz de frequência, furos cônicos revestidos com A. C-scan (a) e B-scan (b).

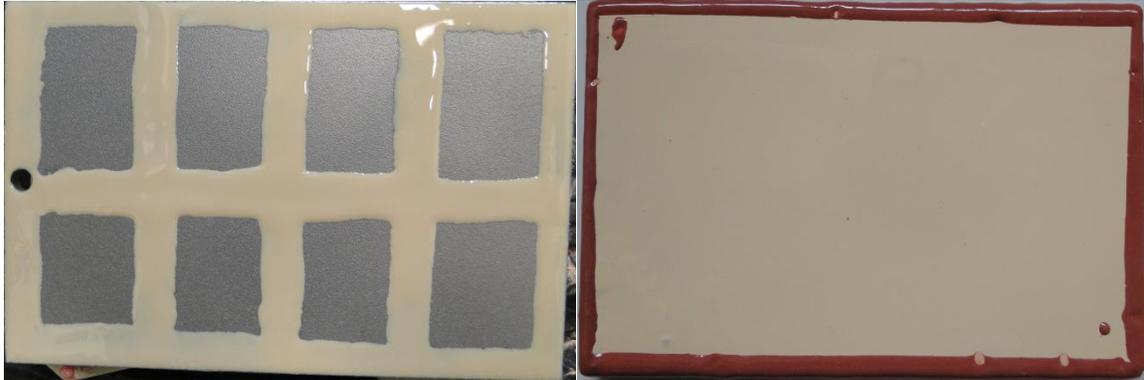
Pode-se observar na imagem de B-scan e C-scan que é possível identificar a região dos furos, porém com mais dificuldade do que no caso dos furos realizados com fresa. Pois neste caso (furos cônicos), o feixe sônico incide na superfície cônica e dispersa, apenas uma pequena parte volta, dificultando assim a detecção destes tipos de defeitos.

Ainda não houve resultados conclusivos sobre as amostras com produto de corrosão nos furos, pois as amostras preparadas não ficaram boas. Houve regiões onde o filme livre não aderiu ao substrato gerando locais com falhas de aderência, prejudicando a inspeção e a caracterização dos defeitos. Este fato foi descoberto através de ensaio de termografia que estão sendo analisados em outro projeto.

Foram inspecionadas também amostras que simulam falhas de aderência entre o substrato de aço carbono e o revestimento em consideração. A preparação destes corpos de prova foi descrita no item 4.2.2. Os resultados desta inspeção serão mostrados a seguir. Os parâmetros para inspeção dessas amostras são mostrados na tabela 10.



(a)

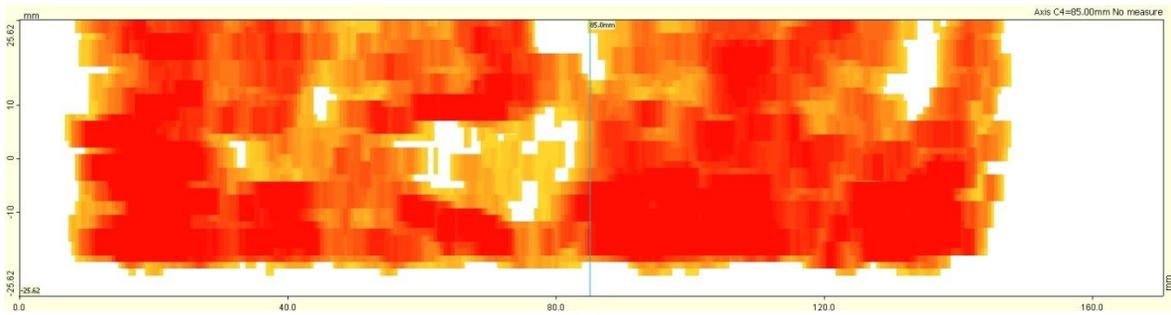


(b)

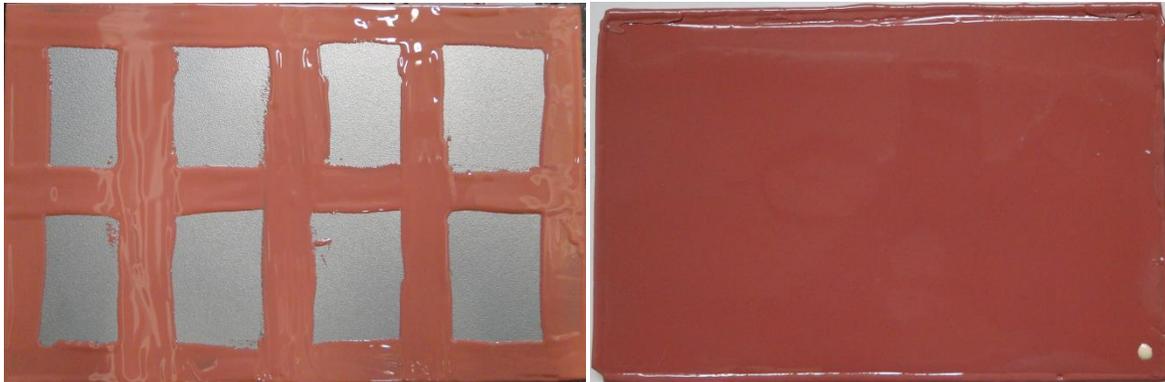
(c)

Fig. 45. Resultado da inspeção realizada com phased array em amostras simulando falha de aderência. C-scan (a), amostra antes de revestida (b) e amostra já revestida com o revestimento B (c).

É possível observar na imagem em C-scan (figura 45 (a)), realizada com phased array de 2 MHz de frequência, que há regiões mais claras (alaranjadas) ou regiões brancas. Estas regiões são os locais de possível falta de aderência entre o revestimento e o substrato metálico. Os espaços em branco mostram a perda de sinal o que caracteriza regiões de possíveis ocorrências de falhas.



(a)



(b)

(c)

Fig. 46. Resultado da inspeção realizada com phased array em amostras simulando falha de aderência. C-scan(a), amostra antes de revestida(b) e amostra já revestida com o revestimento A (c).

A figura 46 (a) mostra o resultado da inspeção realizada no revestimento A, aqui o mesmo raciocínio utilizado anteriormente é válido. As regiões mais claras e brancas representam locais de possíveis falhas. Outro ponto a destacar é que quando colado o revestimento sobre a placa, as regiões sem revestimento mostradas na figura 46 (b), não permanecem retangulares como na imagem. Estas linhas de revestimento, com a colagem do filme seco, se espalham e não assumem uma forma definida.

5.5. Inspeção em Amostras Provenientes de Ensaios de Corrosão

Posteriormente foram realizadas inspeções em corpos de prova recém retirados de ensaio de corrosão em autoclave. Estes CP's estiveram imersos em solução salina contendo H_2S a 150 e 180°C. Neste caso, os defeitos podiam ser vistos na superfície do revestimento. Eram defeitos de empolamento, defeitos estes que sempre vêm acompanhados de descolamento acentuado do revestimento do substrato metálico como mostrado na figura 47.

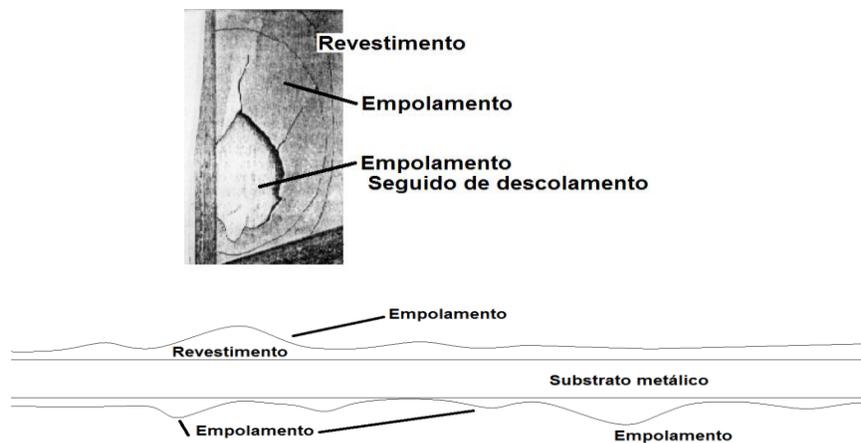


Fig. 47. Representação esquemática dos defeitos de empolamento. (a) Fotografia exemplo de empolamento seguido de descolamento (b) desenho esquemático.

Os revestimentos ensaiados neste caso são denominados D, E e F. O segundo índice da nomenclatura é C e significa que o substrato é de aço carbono.

- ✓ Revestimento D em substrato de aço carbono (DC);
- ✓ Revestimento E em substrato de aço carbono (EC);
- ✓ Revestimento F em substrato de aço carbono (FC);

Para este caso os parâmetros de formação da lei focal foram reformulados e podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10. Parâmetros de lei focal phased array para inspeção dos corpos de prova com falha de aderência e submetidos a ensaios de corrosão em autoclave.

Primeiro elemento da seqüência	1
Números de elementos de transmissão em seqüência	23
Números de elementos de recepção em seqüência	23
Número de passos em seqüência	42
Função	“Simple Electronic Scanning”
Varredura da lei focal	“Simple sweep”
Ponto focal	Na interface substrato / revestimento
Tipo de lei	“Single point focusing”
Cabeçote	PA Linear Imasonic / 64 elementos
Freqüência	2 MHz
Acoplamento	Água / Imersão

A única diferença para este caso na formação da lei focal é que esta agora forma o foco na interface substrato / revestimento e não mais se trata de focalização múltipla e sim de simples ponto de foco em um único ponto.

Esta modificação foi realizada, pois se tratava de defeitos na superfície do material e a utilização do ponto focal na interface substrato / revestimento parecia ser a opção mais adequada.

O desenho esquemático da figura 48 demonstra de que forma e em que região o foco simples é formado observando-se transversalmente a amostra.

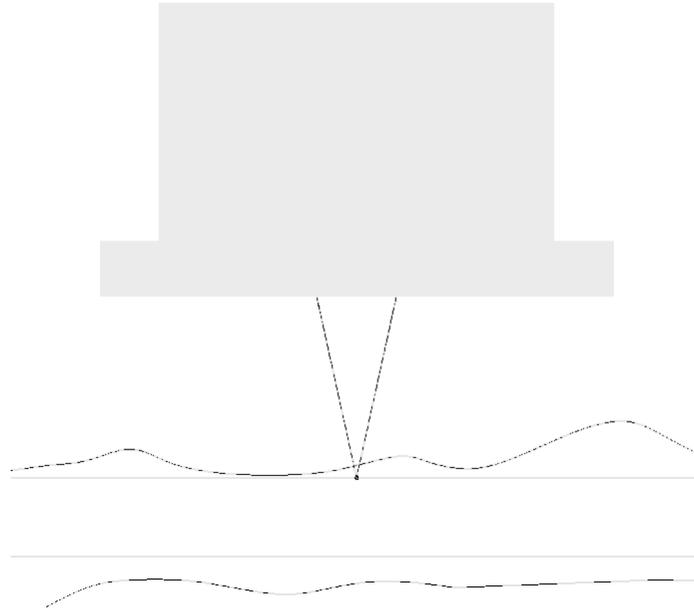


Fig. 48. Desenho esquemático com a formação de foco na interface substrato / revestimento.

Os resultados da inspeção para este caso são exibidos a seguir.

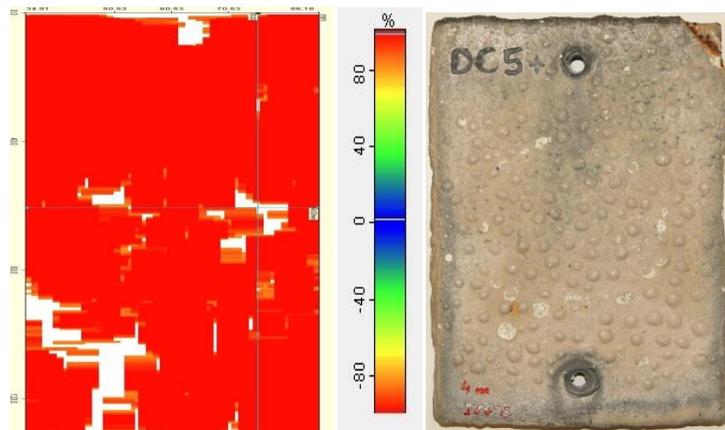


Fig. 49. Resultado de ensaio phased array para amostra DC 5+.

A figura 49 mostra o resultado da inspeção para a amostra DC5+, se pode observar que algumas bolhas são vistas na imagem em C-scan, enquanto que outras não

são detectadas. Isto se deve ao fato de que em algumas bolhas o sinal incide na superfície e é refletido de volta para o transdutor, enquanto que em outras bolhas o sinal incide e é refletido para outra direção ocasionando a perda de sinal.

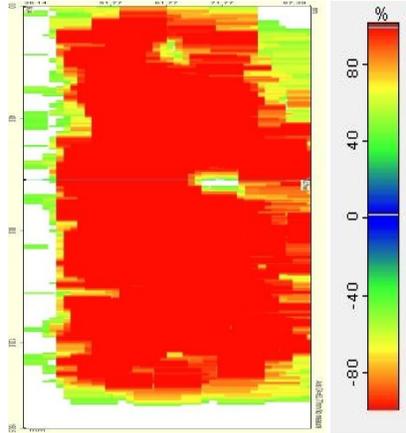


Fig. 50. Resultado de ensaio phased array para amostra DC 11+.

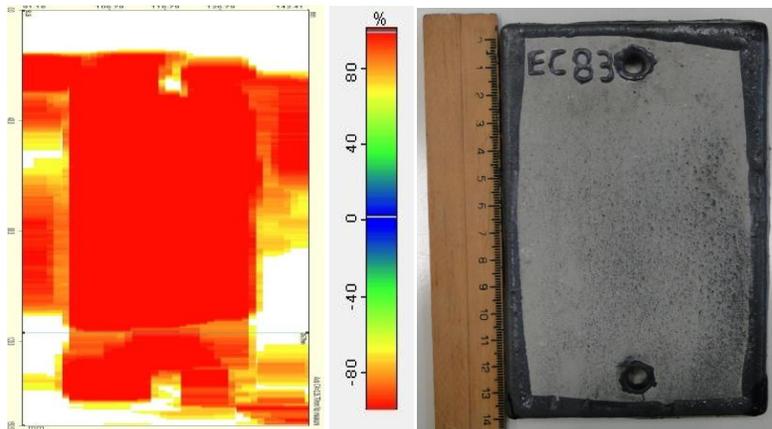


Fig. 51. Resultado de ensaio phased array para amostra EC 83.

Nas figuras 50 e 51 se pode observar que os problemas de borda são muito mais acentuados do que os problemas de empolamento. Isto se deve ao fato da ocorrência de falhas no isolamento das bordas por onde a solução pode permear e ocasionar defeitos. Deve-se levar em consideração outro fator, que é a perda de sinal causa pela maior espessura da borda. No equipamento de phased array selecionamos uma faixa de sinal a ser observado (*gate*) quando a espessura é maior, como no caso da borda, o sinal se desloca e sai dessa faixa, ocasionando assim a perda de sinal. A comprovação se é ou não um defeito só poderá ser feita se a amostra for aberta para que se possa observar estas regiões visualmente.

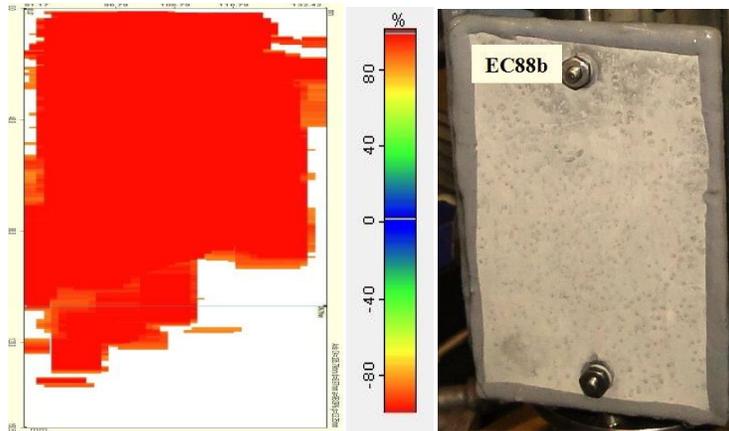


Fig. 52. Resultado de ensaio phased array para amostra EC 88.

Na figura 52 a região branca caracteriza perda de sinal causada pela variação de espessura do revestimento ou por um desnível da mesa de inspeção. O mesmo raciocínio utilizado anteriormente para as amostras 50 e 51 é válido para este caso.

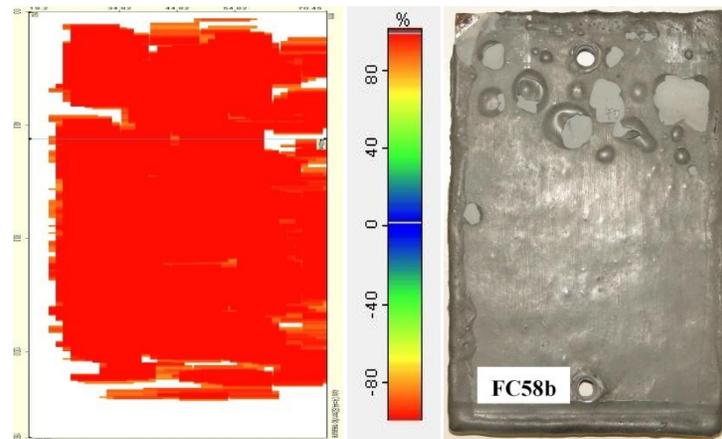


Fig. 53. Resultado de ensaio phased array para amostra FC 58.

Na amostra FC 58 o empolamento foi na última camada do revestimento e não prejudicou a aderência das demais camadas. O mesmo raciocínio feito anteriormente para a amostra DC 5+ é válido neste caso.

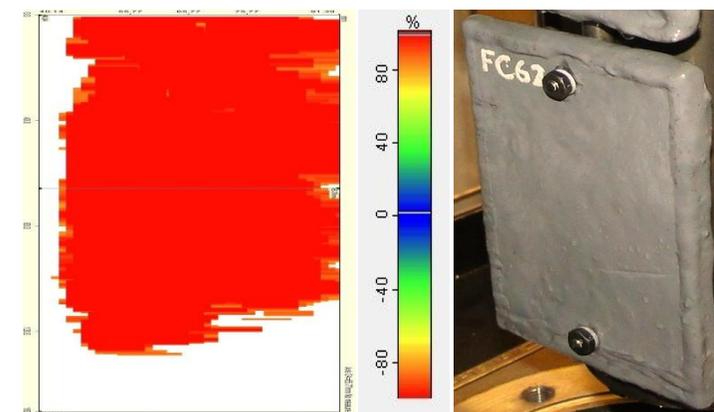


Fig. 54. Resultado de ensaio phased array para amostra FC 62.

Na figura 54 não foi detectado nenhum tipo de defeito a não ser a perda de sinal justificada pelos mesmos motivos já citados anteriormente.

Os ensaios de phased array nesta configuração forneceram resultados satisfatórios visto que é possível de se detectar defeitos sob a camada de revestimento. Os defeitos superficiais nem sempre são evidenciados, mas existem recursos que ainda não foram utilizados como, por exemplo, sensores ultra-sônicos phased array de outras frequências e tamanhos assim como transdutores de ultra-som convencional focados.

Para formação do foco é necessário se empregar uma distância mínima para que o mesmo se forme isto inviabiliza o ensaio ultra-sônico por contato para detecção destes tipos de defeitos citados anteriormente de modo que todos os ensaios anteriores foram realizados por imersão com uma coluna d'água de 10 mm.

Conclusão

Como mostrado no capítulo 3, a necessidade de técnicas instrumentadas para a detecção de defeitos abaixo da camada de revestimento é de grande relevância, visto que por uma simples inspeção visual não seria possível a detecção dos mesmos.

O ensaio não destrutivo por ultra-som convencional não mostrou grande sensibilidade na detecção de falhas abaixo da cada de revestimento, porém este resultado não é definitivo. Através da utilização de transdutores focados pode ser que seja possível detectar estes defeitos. O ensaio com estes transdutores só não foi realizado, pois ainda não há estes tipos de transdutores no LNDC. Essa tarefa é deixada como sugestão para continuação deste trabalho.

Através do uso da lente na inspeção por ultra-som convencional foi melhorada a resolução, porém ainda não suficiente para a detecção de defeitos abaixo da camada de revestimento. A lente utilizada, de espessura 5 mm, implicou diretamente no resultado da inspeção, pois com essa espessura o feixe ultra-sônico era bastante atenuado, em outras palavras, o feixe perdia energia durante a passagem pela lente e conseqüentemente prejudicava a formação do foco.

A utilização de phased array mostrou ser uma alternativa viável na detecção destes tipos de defeitos. Tanto nas amostras com defeitos controlados, quanto nas amostras provenientes de ensaios de corrosão em autoclave foi possível detectar ambos os tipos de defeitos.

A simulação computacional com CIVA apresentou resultados bastante semelhantes aos resultados encontrados na prática. E é importante para selecionarmos as melhores condições e parâmetros de ensaio. Porém para a realização da simulação são necessários alguns parâmetros de entrada, como mencionado anteriormente. O tempo de simulação varia para diferentes tipos de transdutores. Para transdutor comum sem revestimento o tempo é de 10 minutos, com revestimento é de 6 horas. Já para Phased Array sem revestimento o tempo é de 15 minutos, enquanto que com revestimento o tempo total é de 12 horas.

Considerando todos os resultados apresentados no presente trabalho, inclusive os resultados de simulação computacional, a melhor alternativa para a detecção de falhas em revestimentos orgânicos mostrou ser a utilização transdutores focados e de baixa frequência devido à característica do material de atenuar muito o feixe ultra-sônico.

Referências

1. CHANG, Li-Shin and CHUANG, Tung-Han, 1997. **Ultrasonic Testing of Artificial Defects in Alumina Ceramic**. Institute of Materials Science and Engineering, National Taiwan University.
2. ASHER, R. C., 1997. **Ultrasonic Sensors**. Bristol e Philadelphia, USA: Institute of Physics Publishing. pp. 473. ISBN 0-7503-0361-1.
3. 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. **ScienceDirect**.
4. ASM Handbook. **Nondestructive Evaluation and Quality Control**. Vol. 17. 1989.
5. ANDREUCCI, Ricardo. ABENDI. **Associação Brasileira de Ensaio Não-Destrutivos e Inspeção**. [Online] Julho 2003. www.abendi.org.br
6. TEBALDI, A. 2004. **Detecção de Falhas Estruturais Usando Sensores e Atuadores Piezoelétricos e Algoritmos Genéticos**. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, SP.
7. GENTIL, Vicente. 2007. **Corrosão**. Rio de Janeiro. LTC.
8. NESVIJSKI, E. G. 2000. **Some Aspects of Ultrasonic Testing of Composites**. Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria.
9. NDT Resource Center. **Introduction to Ultrasonic Testing**. [Online] www.ndt-ed.org
10. VIKTOROV, I. A., 1967. **Rayleigh and Lamb Waves. Physical Theory and applications**. New York: Plenum Press, pp. 46-56.
11. GUSEV, V., DESMET, C., LAUIKS, W., GLORIEUX, C., THOEN, J., 1996. **Journal of the Acoustical Society of America**. pp 1514-1528.
12. LAKESTANI, Fereydoun, COSTE, Jean-François and DENIS, René, 1995. Application of Ultrasonic Rayleigh Waves to Thickness Measurement of Metallic Coatings. **Elsevier**. Vol. 28, No. 3, pp. 171-178.
13. PIRES, G. P., 2009. **Inspeção Ultra-Sônica Utilizando Transdutores Phased Array: Simulação Computacional para a Detecção de Trincas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
14. FORSBERGH, Jr, P. W. Encyclopedia of Physics. 1956. **Piezoelectricity, electrostriction and ferroelectricity**. Berlin. Vol. 17. s/n. pp. 264-392.

15. TEBALDI, A., COELHO, L. S., JUNIOR, V. L. 2006. **Detecção de falhas em estruturas inteligentes usando otimização por nuvem de partículas: fundamentos e estudo de casos.** Sociedade Brasileira de Automática. Campinas, SP. Vol. 17.
16. 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.
17. American Society for Nondestructive Testing. **Nondestructive Testing Handbook.** 1991. 2ª Ed. Vol. 7.
18. SANTI, J. L. **Ultra-som Técnica e Aplicação.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 1996. 1ª Ed.
19. CARNEVAL, R. O., MOREIRA, A. B., SOUZA, C., RICHTER, M. R., SANTOS, J. J. M. and SIMÕES, H. R., 2007, **Uso das Técnicas de END: Ultra-som (TOFD e Phased Array), Radiografia, Partículas Magnéticas e ACFM na Avaliação de Juntas Soldadas com Trincas de Fadiga.** IV Conferência Panamericana de END. Buenos Aires.
20. **NDT e Scantech do Brasil.** [Online] www.ndtdobrasil.com.br/phasedarray.php
21. MARIANESCHI, E. and TILI, T., 1983. **A note on the smallest defect that can be detected using ultrasonic.** NDT International.
22. REBELLO, J. M. A., KRUGER, S. E. and CHARLIER, J. **Characterization of cast irons by leaky Rayleigh surface acoustic waves.**
23. ASM Handbook. **Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection.** 2003. Vol. 13A.
24. VERNON, W. H. J. 1957. **Metallic Corrosion and Conservation of Natural Resources.** Institution of Engineers. Londres, s/n. pp. 105-133.
25. BIERWAGEN, G. P., 1995. **Reflections on Corrosion Control by Organic Coatings.** No. 28.
26. MORCILLO, M., 1989. **Efectos de la contaminación atmosférica en la durabilidad de sistema acero/pintura.** 3º Congresso Iberoamericano de Corrosão. Rio de Janeiro, Brasil: ABRACO.
27. MORCILLO, M. and SIMANCAS, J., 1992. **Corrosão e Proteção de Materiais.**
28. VELEVA, L., CHIN, J. and DEL AMO, B., 1999. **Progress in Organic Coatings.** No. 36.
29. GRUNDMEIER, G., ROSSENBECK, B., ROSCHMANN, K. J., EBBINGHAUS, P. and STRATMANN, M., 2006. Corrosion Science. **ScienceDirect.** No. 48.
30. YANG, L. H., LIU, F. C. and HAN, E. H., 2005. **Progress in Organic Coatings.** No. 53.

31. POPA, M. V., DROB, P., VASILESCU, E., MIRZA-ROSCA, J. C., SANTANA-LOPEZ, A., VASILESCU, C. and DROB, S. I., 2006. **Materials Chemistry and Physics**. pp. 296.
32. KAALENDOVA, A., VESELY, D., KALENDA, P., 2006. **Pigment & Resin Technology**. No. 35.
33. **Pigment & Resin Technology**. No. 36. 2007.
34. MUNGER, C., 1984, **Corrosion prevention by Protective Coatings**. Houston: NACE, pp. 512.
35. LEITE, Eduardo Antonio. **Avaliação dos Riscos Ocupacionais Provocados pela Resina Epóxi aos Trabalhadores do Setor de Mármore e Granitos de Cachoeiro de Itapemirim-ES**. Monografia de Conclusão do Curso de Especialização em Perícia Médica da Universidade Gama Filho e Fundação Unimed. Vitória, ES.
36. STERMAN, J. D., 1991, "A Skeptic's Guide to Computer Models". In: Barney, G. O. *et al.* (Eds.), **Managing a Nation: The Microcomputer Software Catalog**. Boulder, CO: Westview Press, 209-229.
37. WALL, M., BURCH, S., 2000, "Worth of Modelling for Assessing the Intrinsic Capability of NDT". In: **15th World Conference in Non-Destruction Test**. Rome.
38. CALMON, P.; MAHAUT, S.; CHATILLON, S.; RAILLON, R., 2006, "CIVA: An Expertise Platform for Simulation and Processing NDT Data", **Ultrasonics**. V. 44, pp. 975-979.
39. GINZEL, E., 2007a, "NDT Modelling: An Overview", **Conference on Modelling in Non-Destructive Testing**, The University of Pretoria, South Africa, May, 21st-22nd.

Anexo

Rotina MATLAB – Rotina para montar as imagens C-scan na inspeção por ultra-som convencional.

```
clear
clc
close all

cd('C:\Program Files\MATLAB\Sinais');

% Calculo do Passo
%Posicao=load('Distancias30 x 30 0.txt');

%Sinal=load('ASCAN250x250.txt');
Sinal=load('A SCAN20 x 50 0_2.txt'); % 1º Etapa: Alterar o nome do arquivo que você vai
chamar!

% 2º Etapa aperte F5
% A rotina vai dar um erro, mas vai gerar a Figura (1)
% Selecione o trecho da imagem que voce vai trabalhar
% Dica: O Trecho de interesse em geral e o que não se trata de uma reta

figure(1),imagesc(Sinal);

% 3º Etapa: Enjanelamento escolha o a e b de seu interesse
% A quarta e ultima etapa e o de inserir o passo
% Va para as linhas 46 e 47 da rotina
a=389;
b=504;% o x e a quantidade de sinais
ascan=Sinal(1:end,a:b);

ruído=0.0005;

for j=1:size(ascan,2);
    for i=1:size(ascan,1);

        if ascan(i,j)<=ruído;
            ascan1(i,j)=0;
        else ascan(i,j)>=ruído;
            ascan1(i,j)=abs(ascan(i,j));
        end;

    end;
end;

passo1=20; % Passo1 e o numero do arquivo primeiro
passo2=50; % Passo2 e o numero do arquivo segundo

%Exemplo: A SCAN 60 x 40, passo1 = 60 e passo2 = 40;
```

% Vai depender de como foi feito no ensaio, esta para zig zag

```
for n=1:size(ascan1,1);
```

```
    [Y(n,1) l(n,1)]=max(ascan1(n,:));
```

```
end;
```

```
m=0;
```

```
for r=1:passo1;
```

```
    for p=1:passo2;
```

```
        m=m+1;
```

```
        Cscan1(r,p)=Y(m,1);
```

```
        Cscan2(r,passo2+1-p)=Y(m,1);
```

```
        Cscan3(r,p)=l(m,1);
```

```
        Cscan4(r,passo2+1-p)=l(m,1);
```

```
    end;
```

```
end;
```

```
h=0;
```

```
for q=1:passo1;
```

```
    teste=mod(q,2);
```

```
    if teste==1;
```

```
        h=h+1;
```

```
        Cscan(h,:)=Cscan1(h,:);
```

```
    else teste==0;
```

```
        h=h+1;
```

```
        Cscan(h,:)=Cscan2(h,:);
```

```
    end;
```

```
end;
```

```
h=0;
```

```
for q=1:passo1;
```

```
    teste=mod(q,2);
```

```
    if teste==1;
```

```
        h=h+1;
```

```
        CscanA(h,:)=Cscan3(h,:);
```

```
    else teste==0;
```

```
        h=h+1;
```

```
        CscanA(h,:)=Cscan4(h,:);
```

```
    end;
```

```
end;
```

```
figure(2),subplot(2,1,1),imagesc(Cscan),colormap gray  
title('C-scan por tempo');
```

```
xlabel('pontos (passo vs distancia)');  
ylabel('pontos (passo vs distancia)');  
  
figure(2),subplot(2,1,2),imagesc(CscanA),colormap gray  
title('C-scan por Amplitude');  
xlabel('pontos (passo vs distancia)');  
ylabel('pontos (passo vs distancia)');
```