



INSPEÇÃO POR ULTRASSOM DE JUNTAS ADESIVAS DE TUBULAÇÕES EM MATERIAL COMPÓSITO

Priscila Duarte de Almeida

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

Orientador: João Marcos Alcoforado
Rebello

Rio de Janeiro

Dezembro de 2011

INSPEÇÃO POR ULTRASSOM DE JUNTAS ADESIVAS
DE TUBULAÇÕES EM MATERIAL COMPÓSITO

Priscila Duarte de Almeida

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

Examinada por:

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, Dr.

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph.D.

Prof.^a Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO de 2011

Almeida, Priscila Duarte

Inspeção Por Ultrassom de Juntas Adesivas de Tubulações em Material Compósito/ Priscila Duarte de Almeida. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2011.

VIII, 65 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Materiais, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 63-65.

1. Ultrassom 2. Materiais Compósitos. 3. Falta de Adesão. 4. Falta de Adesivo. 5. Calibração do Ensaio.

I. Rebello, João Marcos Alcoforado. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Materiais. III. Inspeção Por Ultrassom de Juntas Adesivas de Tubulações em Material Compósito

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

INSPEÇÃO POR ULTRASSOM DE JUNTAS ADESIVAS DE TUBULAÇÕES EM MATERIAL COMPÓSITO

Priscila Duarte de Almeida

Dezembro/2011

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Curso: Engenharia de Materiais

Materiais compósitos representam atualmente um papel de extrema importância nos setores tecnológico e industrial, pois podem oferecer impressionantes combinações de propriedades que materiais puramente metálicos, poliméricos ou cerâmicos nunca conseguiriam oferecer. Na indústria petrolífera em particular, estes materiais demonstram ser uma boa alternativa quando utilizados em dutos e risers, uma vez que possuem propriedades mecânicas equivalentes ou até superiores às de materiais metálicos, ao mesmo tempo em que são muito mais leves e mais resistentes à corrosão, reduzindo, portanto custos de manutenção. Como este tipo de material é empregado em áreas vitais da linha de produção industrial e, portanto, deve ter sua integridade garantida, é interessante que haja um método confiável de inspeção não-destrutiva da estrutura que não implique em paradas de produção. Porém, não existe na literatura nenhum método consolidado de inspeção não-destrutiva para o tipo de material em estudo. O objetivo deste trabalho é avaliar e determinar os parâmetros de ensaio para inspeção ultrassônica, pelo método pulso-eco, para a detecção de defeitos como a falta de adesão e a falta de adesivo polimérico empregado na união entre trechos de dutos com matriz de resina epóxi e reforço em fibra de vidro. Com base em metodologias desenvolvidas e nos resultados obtidos, foram determinadas as melhores configurações para a inspeção do material em questão, considerando variáveis como blocos de referência, calibração do equipamento, faixa de frequências de transdutores a ser utilizada nas inspeções e a necessidade ou não de preparo superficial dos dutos.

Palavras-chave: Ultrassom, Compósitos, Calibração

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

ULTRASONIC INSPECTION OF ADHESIVE JOINTS OF COMPOSITE PIPELINES

Priscila Duarte de Almeida

Dezembro/2011

Advisor: João Marcos Alcoforado Rebello

Course: Materials Engineering

Composite materials current represent an important role in technological and industrial sectors, since they can offer impressive combinations of properties that materials purely metallic, polymeric or ceramic would never be able to offer alone. In oil industry in particular, these materials prove to be a good alternative when used in pipelines and risers, as they have mechanical properties equivalent or even superior to those of metallic materials, at the same time they are much lighter and more corrosion-resistant, thereby reducing maintenance costs. Since this type of material is used in vital areas of industrial production line and therefore must have its integrity assured, it is interesting to have a reliable non-destructive inspection of the structure that prevents production shutdowns. However, there is no consolidated methodology in literature on non-destructive inspection for this type of material. The objective of this work is to evaluate and determine the test parameters for ultrasonic inspection, through pulse-echo technique, in order to detect defects such as lack of adhesion and lack of adhesive of the polymer used in the union of composite pipelines in epoxy resin matrix and fiberglass reinforcement. Based on laboratorial developed methods, we determined the best settings for the inspection of the material in study, considering variables such as reference blocks, equipment calibration, frequency range of transducers to be used in inspections and the need of surface preparation of the pipelines.

Keywords: Ultrasonic, Composites, Calibration

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus, a quem sempre recorro nos momentos de angústia, por ter me permitido cumprir mais esta etapa de minha vida;

Aos meus pais, Madalena e Edmilson, por todo o apoio e pelos sábios conselhos que me deram durante toda a minha vida;

Ao professor João da Cruz Payão Filho, meu orientador acadêmico, que sempre me auxiliou prontamente frente às muitas dificuldades que enfrentei durante estes anos de graduação;

Ao professor João Marcos Alcoforado Rebello, por toda a sua orientação ao decorrer de minha iniciação científica e por ter me dado a oportunidade de realizar este projeto;

A todo corpo docente da MetalMat, que contribuiu com a minha formação;

À Petrobras, pelo suporte tecnológico e financeiro direcionado a este projeto;

À toda equipe do LNDC - Laboratório de Ensaaios Não-Destrutivos, Corrosão e Soldagem - em especial ao engenheiro Marcos Paulo Vieira de Souza, companheiro em muitos desafios no decorrer dos últimos anos;

Aos amigos de turma da MetalMat, que me acompanharam durante esta jornada e com quem dividi inúmeros momentos de alegrias e de desespero perto das avaliações;

Aos amigos alheios ao universo acadêmico da engenharia, que compreenderam minha frequente ausência durante épocas de provas e seminários.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Materiais Compósitos	3
2.1.1. Compósitos de Matriz Polimérica com Reforço em Fibra de Vidro	4
2.2. Inspeção Ultrassônica Convencional	5
2.2.1. Princípios do Ensaio por Ultrassom.....	5
2.2.2. Efeito Piezoelétrico.....	6
2.2.3. Técnicas de Inspeção	6
2.2.4. Avaliação dos Resultados	8
2.2.5. Variáveis do Ensaio Ultrassônico.....	9
2.2.5.1.Procedimento de Calibração	9
2.2.5.2.Blocos de referência	9
2.2.5.3.Frequência de Inspeção e Sensibilidade do Ensaio	10
2.2.5.4.Tipo de Transdutor	10
2.2.6. Inspeção Ultrassônica em Compósitos.....	14
3. Materiais e Métodos	21
3.1. Corpos de Prova	21
3.2. Defeitos Estudados	22
3.3. Blocos de Referência	24
3.4. Configurações do Ensaio	24
3.4.1. Transdutores	24
3.4.2. Metodologias testadas.....	25
3.4.2.1.Metodologia 1	25
3.4.2.2.Metodologia 2.....	26
3.4.2.3.Metodologia 3.....	26
3.4.2.4.Metodologia 4.....	26
3.5. Ensaio de Envelhecimento	27
3.5.1. Corpos de Prova.....	28
3.5.2. Medidas das Velocidades Sônicas	29
3.5.3. Configurações do Ensaio	30
4. Resultados e Discussão	31

4.1. Transdutores	31
4.2. Caracterização de Regiões Defeituosas	32
4.3. Determinação da Velocidade Ultrassônica	32
4.4. Determinação do Ganho de Inspeção	34
4.4.1. Mapeamento das Juntas	34
4.4.1.1. Metodologia 1	34
4.4.1.2. Metodologia 2.....	37
4.4.1.3. Metodologia 3.....	38
4.4.1.4. Metodologia 4.....	38
4.4.2. Preparo Superficial.....	41
4.4.3. Sensibilidade do Ensaio	42
4.4.4. Traçagem da Abertura do Feixe Sônico	43
4.4.5. Corte das Juntas.....	44
4.4.6. Ensaio de Envelhecimento.....	50
4.4.6.1. Variação de Massa.....	50
4.4.6.2. Comportamento do Sinal Ultrassônico.....	53
4.4.6.3. Comportamento da Velocidade Ultrassônica.....	59
5. Conclusões	60
6. Trabalhos Futuros	62
7. Referências Bibliográficas	63

1.Introdução

O intenso avanço tecnológico que ocorre na sociedade moderna impulsiona o desenvolvimento de novos materiais que consigam apresentar combinações de propriedades, até certa altura na história consideradas improváveis, mas que se mostram cada vez mais necessárias. Ótimos exemplos de tal afirmação são as indústrias aeronáutica e de petróleo, óleo e gás, que necessitam de materiais com excelentes propriedades mecânicas ao mesmo tempo em que os mesmos devem ter baixo peso específico.

Materiais compósitos demonstram ser uma excelente alternativa para tais aplicações, uma vez que nada mais são do que a união de dois ou mais materiais com características e propriedades distintas que, quando combinados, resultam em um novo material com desempenho superior em relação ao apresentado pelos materiais originais considerados separadamente.

Compósitos possuem larga aplicabilidade em indústrias *offshore*, nas quais, além de uma boa relação entre peso específico e resistência mecânica, a alta resistência à corrosão também se torna um requisito importante. Assim, frequentemente é possível encontrar estes materiais em estruturas críticas, submetidos a esforços estáticos ou dinâmicos, cujo funcionamento deve ser contínuo, e a falha estrutural é catastrófica e, portanto, inadmissível. Conseqüentemente, tais estruturas devem ser periodicamente inspecionadas para que sua integridade seja garantida.

Diversos ensaios não-destrutivos já são consolidados na inspeção de materiais metálicos, que são de uso tradicional sob essas condições. Porém, muitos destes ensaios se mostram ineficientes na detecção de defeitos em estruturas de materiais compósitos. Deste modo, a aplicabilidade de ensaios não-destrutivos na inspeção de materiais compósitos vem sendo objeto de estudo de diversos autores nas últimas décadas.

Este trabalho tem por objetivo avaliar a adequação e a sensibilidade da inspeção ultrassônica, pelo método pulso-eco, na detecção dos defeitos de falta de adesão e falta de adesivo, frequentemente observados em juntas adesivas de material compósito de matriz polimérica reforçada por fibra de vidro. Para isto, são avaliadas algumas variáveis deste tipo de ensaio, tais como: frequência/tipo de transdutor, bloco

de referência, procedimento de calibração, ganho de inspeção e necessidade de preparo superficial do duto.

Os capítulos seguintes estão estruturados da seguinte forma:

O capítulo dois apresenta uma breve descrição de materiais compósitos, dando ênfase ao objeto de estudo do presente trabalho - compósitos de matriz polimérica reforçada por fibra de vidro. Em seguida, a inspeção ultrassônica convencional é abordada, com destaque à técnica de pulso-eco, considerando-se algumas variáveis essenciais para a aplicação deste ensaio. Por fim, são estudados alguns trabalhos existentes na literatura referentes a pesquisas desenvolvidas no âmbito da inspeção ultrassônica de materiais compósitos.

No capítulo três, é feita uma descrição dos materiais e métodos utilizados para a realização deste projeto. São apresentados os tipos de defeitos estudados e as metodologias de inspeção empregadas, assim como o ensaio de envelhecimento realizado ao decorrer do desenvolvimento do projeto.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos em cada metodologia, assim como informações retiradas do ensaio de envelhecimento. É realizada uma comparação entre os resultados considerados mais promissores dentre as metodologias testadas e a estrutura real das camadas adesivas de algumas juntas selecionadas para o corte físico. Assim, a metodologia mais adequada é apontada e, adicionalmente, é realizada uma estimativa de sua sensibilidade.

Finalmente, o capítulo cinco apresenta as conclusões obtidas após a realização de todas as etapas do projeto.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Materiais Compósitos

Materiais compósitos são formados através de processos artificiais e possuem em sua estrutura duas ou mais fases quimicamente diferentes, apresentando combinações de propriedades dos materiais que constituem cada fase, de forma que estes materiais combinados tenham propriedades superiores às que possuíam de forma independente [1]. Na configuração mais usual, uma das fases, denominada matriz, é contínua, e a outra, denominada reforço, é descontínua. A matriz geralmente é mais dúctil e menos resistente do que o reforço, que, por sua vez, confere a resistência mecânica do material propriamente dita [2]. Compósitos podem ser classificados de acordo com o material que compõe a matriz – poliméricos, metálicos ou cerâmicos – ou de acordo com o formato do reforço – particulados ou fibrosos [1]. Existem ainda diversas subcategorias nas quais materiais compósitos podem ser classificados, como, por exemplo, de acordo com o tipo e a disposição dos reforços [1]. A figura 1 apresenta as subcategorias de classificação.

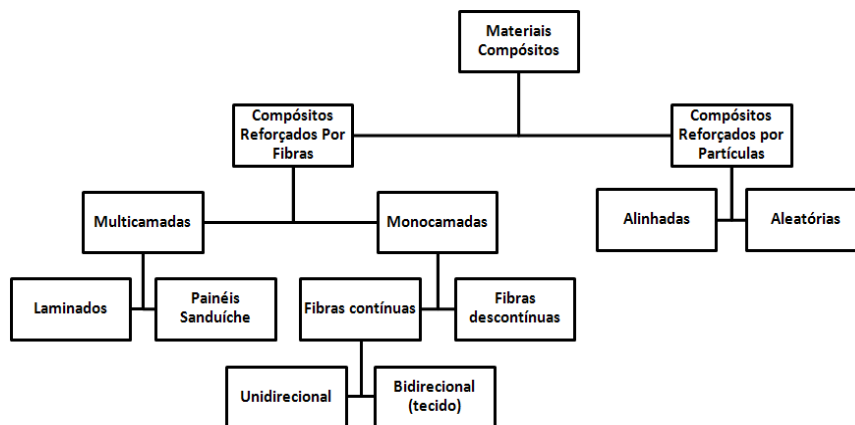


Figura 1 – Possíveis classificações de materiais compósitos. Adaptado de [3]

Compósitos de matriz polimérica reforçados por fibra de vidro terão suas características apresentadas de forma mais detalhada a seguir.

2.1.1. Compósitos de Matriz Polimérica com Reforço em Fibra de Vidro

Dentre todas as classes de materiais compósitos, os de matriz polimérica são os de mais fácil fabricação, pois polímeros permitem, de forma geral, baixas temperaturas de processo para serem conformados [1]. O polímero que constitui a matriz pode ser tanto termoplástico como termofixo, sendo os mais utilizados para tal aplicação os poliésteres insaturados e as epóxies [4-6].

A matriz polimérica possui, como principal função, a transferência do carregamento aplicado no compósito para as fibras, mantendo-as ancoradas e agrupadas, assim como protegendo-as contra danos superficiais (abrasão mecânica ou reações com o ambiente), e, portanto, contribui com o controle das propriedades do compósito [7].

Neste tipo de compósito, o reforço pode estar presente na forma de partículas ou fibras, de forma que partículas possuem menor poder de reforço. As fibras, a priori, possuem a finalidade de aumentar a resistência mecânica do material, mas também podem assumir outras funções, como, por exemplo, diminuição de custos ou aumento da estabilidade dimensional do material [5,8]. As fibras mais empregadas são as de vidro e as de carbono. Fibras de vidro possuem características como baixo coeficiente de dilatação térmica, altas propriedades mecânicas que se mantêm em altas temperaturas, facilidade de processamento e baixo custo, que as tornam interessantes para a aplicação como reforços [5,7].

A fração volumétrica de fibras, sua geometria e disposição são alguns dos principais fatores que determinam as propriedades de compósitos poliméricos. Estas variáveis definem a resistência/rigidez mecânica do material, sua anisotropia e o modo de falha mais provável de ocorrer. Adicionalmente, uma adequada adesão entre fibras e matriz também é de suma importância, pois garante que a transferência de carregamento da matriz para as fibras seja realizada da forma mais eficiente possível, evitando a propagação de trincas e a falha catastrófica do material [8,9].

A principal vantagem deste tipo de compósito é a capacidade de aliar propriedades como baixo peso específico, boa performance mecânica e excelente resistência à corrosão. Conseqüentemente, compósitos poliméricos têm se destacado na substituição de materiais tradicionais nas mais diversas aplicações, especialmente nas estruturais [1,2,4,5,6,10].

2.2. Inspeção Ultrassônica Convencional

Apesar de diversos ensaios não-destrutivos já se encontrarem consolidados na inspeção e caracterização de materiais tradicionais, muitos desses não possuem eficiência alguma quando aplicados em materiais compósitos. Compósitos, heterogêneos por definição, possuem particularidades que dificultam a aplicação de diversos ensaios, reduzindo, portanto, as técnicas em inspeção não-destrutiva aplicáveis a estes materiais.

Durante as últimas décadas inúmeros autores desenvolveram trabalhos no âmbito da inspeção não destrutiva de materiais compósitos, testando diversas técnicas e metodologias. Dentre todas, as inspeções por ultrassom merecem destaque, pois se mostram as mais promissoras, flexíveis e adequadas para a inspeção destes materiais, em suas mais variadas aplicações possíveis.

2.2.1. Princípios do Ensaio por Ultrassom

Em um ensaio típico por ultrassom convencional, um feixe sônico é introduzido no material a ser inspecionado através de um transdutor acoplado ao aparelho, com o objetivo de detectar descontinuidades internas e sub-superficiais [11]. O som que percorre o material é refletido pelas interfaces presentes em sua estrutura, detectado pelo transdutor e analisado por um operador que determina, ou não, a presença, localização e dimensões das descontinuidades.

Ondas mecânicas se propagam em um meio através da oscilação discreta dos átomos deste. Todos os materiais são compostos por átomos que possuem a capacidade de oscilar elasticamente em torno de sua posição de equilíbrio, mesmo quando o material não está sob tensão ou compressão de magnitude superior ao seu limite de proporcionalidade. Quando a energia acústica percorre o material, esta oscilação é provocada e assim a onda se propaga [12,13].

A forma de oscilação dos átomos determina o modo de propagação das ondas ultrassônicas, que pode assumir uma das quatro classificações [11-13]:

- Ondas Longitudinais, que se propagam na mesma direção em que os átomos vibram;

- Ondas transversais, que se propagam na direção perpendicular à de vibração dos átomos;
- Ondas de Rayleigh, que se propagam apenas na superfície dos materiais graças à movimentação oblíqua que provoca, incompatível com a estrutura da rede cristalina e portanto atingindo baixos alcances;
- Ondas de Lamb, um formato mais complexo, no qual as vibrações atingem toda a espessura do material.

2.2.2. Efeito Piezoelétrico

O efeito piezoelétrico é um fenômeno reversível apresentado por alguns materiais, caracterizado como a capacidade destes se expandirem ou comprimirem em resposta a aplicação de uma diferença de potencial externa ou, reciprocamente, produzirem uma polarização dielétrica em resposta a uma deformação externa ao material [11,13]. A figura 2 ilustra o efeito piezoelétrico.

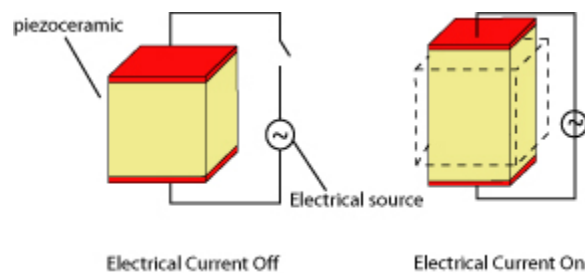


Figura 2 – Efeito Piezoelétrico [13]

Esta conversão mútua entre pulsos elétricos e vibrações mecânicas é o fundamento do método ultrassônico. Materiais piezoelétricos são comumente encontrados na forma de cristais e fazem parte de um componente denominado transdutor, responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam nos materiais.

2.2.3. Técnicas de Inspeção

Duas técnicas distintas podem ser utilizadas na inspeção por ultrassom convencional. A primeira delas, denominada “Técnica por Transmissão”, consiste no emprego de dois transdutores, um responsável por emitir os pulsos de energia sônica e outro responsável por receber estes pulsos [11,14]. A figura 3 ilustra a técnica em

questão. Em ensaios por transmissão, pode-se apenas detectar discontinuidades, sem dimensioná-las ou localizá-las [14]. Os transdutores devem estar em lados opostos da peça, de forma que estejam perfeitamente alinhados. Isto se torna um fator limitante para esta técnica quando seu emprego em campo é considerado, pois frequentemente apenas uma parte da superfície do objeto a ser inspecionado é acessível.

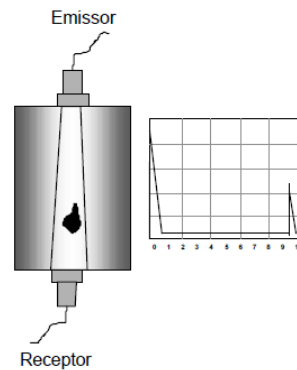


Figura 3 – Técnica por Transmissão [14]

A segunda técnica, denominada “Pulso-Eco”, necessita de apenas um transdutor, que emite e recebe pulsos de energia sônica introduzidos no material em intervalos regulares de tempo. Quando os pulsos encontram alguma superfície refletora, toda a energia ou parte dela é refletida e retorna ao transdutor, que converte as vibrações em energia elétrica e a transforma em sinal na tela do aparelho [11,14]. Por empregar apenas um transdutor, esta técnica encontra maior aplicabilidade em ensaios realizados em campo, já que permite a inspeção através do acesso a apenas uma região da superfície do material. A figura 4 ilustra os princípios da técnica Pulso-Eco.

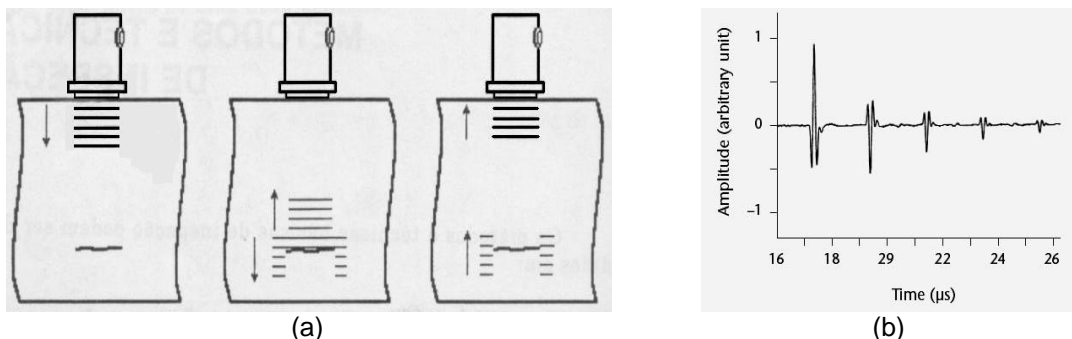


Figura 4 - (a) Esquema de funcionamento do método Pulso-Eco [11] e (b) representação do sinal A-scan na tela do aparelho [12]

2.2.4. Avaliação dos Resultados

A avaliação dos resultados obtidos em inspeções ultrassônicas é realizada de acordo com o sinal retornado pelo transdutor ao aparelho. Este sinal pode assumir diversos formatos, sendo os três mais comuns citados a seguir [11,14,15].

- Sinal A-scan: consiste em um gráfico clássico da amplitude do sinal recebido (eixo vertical) *versus* tempo (eixo horizontal). A figura 4(b) apresenta um sinal A-scan típico.
- Sinal B-scan: nesta configuração, a tela do aparelho reproduz a seção transversal da peça de acordo com a energia do sinal recebido. A figura 5 ilustra um mapa B-scan.

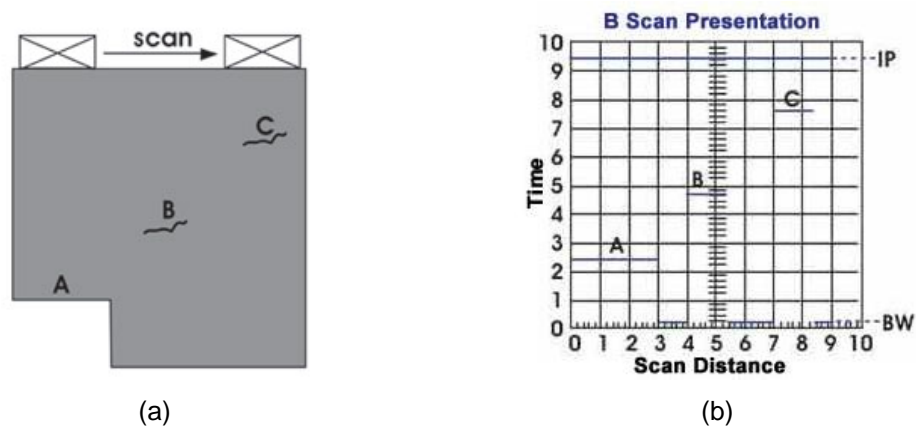


Figura 5 – (a) Representação do corpo de prova inspecionado e (b) indicações no mapa B-scan, onde IP se refere ao pulso inicial e BW ao fundo da peça [13]

- Sinal C-scan: os resultados são plotados em um sistema gráfico correspondente à vista superior da peça em planta, com a dimensão e posição das possíveis discontinuidades. A figura 6 apresenta um mapa C-scan.

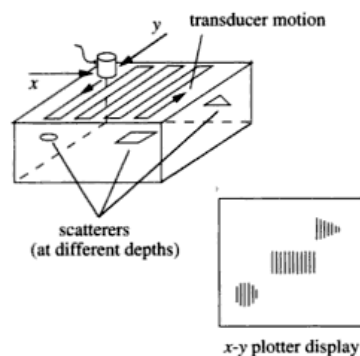


Figura 6 – Exemplo de um mapa C-scan [16]

2.2.5. Variáveis do Ensaio Ultrassônico

Ensaio por ultrassom não possui validade alguma caso algumas precauções não sejam tomadas e etapas sejam seguidas. Variáveis como procedimento de calibração, blocos de referência, frequência de inspeção, tipo de transdutor, velocidade do meio, dentre outras, influenciam diretamente os resultados obtidos, e, portanto, devem ser determinadas previamente à realização da inspeção.

2.2.5.1. Procedimento de Calibração

A calibração é uma das etapas mais importantes do ensaio por ultrassom, pois permite a avaliação e o ajuste da precisão e da acurácia do equipamento a ser utilizado [11,13]. Um mesmo equipamento de ultrassom pode ser utilizado para a inspeção de inúmeros materiais diferentes, e, portanto, cada inspeção possui características próprias que devem ser adequadas.

Procedimentos de calibração são frequentemente regidos por normas. Após a sua realização, espera-se que estejam determinados fatores como escala horizontal, ganho de inspeção, distinção entre defeito e não-defeito, resolução e sensibilidade [11-15].

2.2.5.2. Blocos de referência

Os blocos de referência, também denominados “blocos padrões” ou “blocos de calibração”, são utilizados na calibração da escala da tela do aparelho. Estes blocos geralmente possuem descontinuidades introduzidas em seu interior, de forma que todas as dimensões do bloco e das descontinuidades são conhecidas, tornando possível a determinação das posições exatas dos ecos de reflexão na tela do aparelho de ultrassom [11,13,14]. É preferível que o bloco de referência seja constituído do mesmo material a ser inspecionado, pois as posições dos ecos de reflexão são dependentes da velocidade de propagação da onda ultrassônica, que é característica intrínseca de cada meio [11,14].

2.2.5.3. Frequência de Inspeção e Sensibilidade do Ensaio

Ondas sonoras de frequências superiores a 20kHz são consideradas ultrassônicas [14]. A equação 1 apresenta a relação entre frequência (f), velocidade de propagação (v), e comprimento de onda (λ), que afeta a sensibilidade de um ensaio por ultrassom.

(Equação 1)

Define-se como sensibilidade o menor defeito passível de ser detectado no ensaio. É de aceitação comum que defeitos apenas são detectáveis quando são da ordem de $1,5\lambda$ [14]. Como a velocidade de propagação em um meio é característica intrínseca do próprio, uma mudança na frequência afeta de forma proporcional a sensibilidade do ensaio. Em outras palavras, aumentando-se a frequência, diminui-se o comprimento de onda e aumenta-se a sensibilidade da inspeção.

Porém, um aumento indefinido na sensibilidade não é desejável e muito menos benéfico. Quanto menor é o comprimento de onda (ou maior é a frequência), menores são as interfaces detectadas. Um aumento exagerado na sensibilidade pode gerar a detecção em demasia de discontinuidades que não apresentam risco à estrutura, e, portanto, não são consideradas defeitos, como contornos de grão ou inclusões. Assim, estas discontinuidades geram um maior espalhamento da onda ultrassônica que as atravessa, diminuindo seu poder de penetração e prejudicando a detecção de defeitos localizados em maiores profundidades [13].

A frequência também possui efeitos sobre o formato do feixe ultrassônico após sua saída do transdutor. As ondas ultrassônicas são transmitidas através da vibração das partículas do material; porém, nem toda a energia de vibração é transmitida na mesma direção em que a onda se propaga, podendo ser transmitida em angulações diferentes, causando a divergência do feixe [13-15]. Este efeito é mais pronunciado a menores frequências. A divergência do feixe traz algumas consequências maléficas como, por exemplo, a diminuição da amplitude das reflexões já que em maiores ângulos de divergência há uma menor concentração dos campos sonoros.

2.2.5.4. Tipo de Transdutor

Fatores como sensibilidade e poder de penetração dependem diretamente do transdutor a ser utilizado na inspeção. Isto ocorre pois é o transdutor que define qual será a frequência de inspeção e o modo de propagação da onda gerada.

Conseqüentemente, a importância e o cuidado que devem ser direcionados à escolha do transdutor são inegáveis.

Transdutores podem ser classificados de acordo com a sua aplicação ou com o tipo de onda gerada. A seguir será apresentada uma breve explicação dos tipos de transdutores mais usuais.

a) Classificação quanto à aplicação:

a.1) Transdutores de Contato [11-14]: são usados para inspeções de contato direto, automatizadas ou não, portanto, devem possuir geometria adequada à manipulação. A estrutura externa destes transdutores deve ser de material que apresente boa performance sob esforços mecânicos, principalmente abrasivos. Como o ar é um péssimo meio para a propagação do ultrassom, estes transdutores são utilizados em conjunto com líquidos acoplantes, que permitem a passagem do sinal ultrassônico do transdutor para a superfície do material a ser inspecionado. A figura 7 demonstra a aplicação dos transdutores de contato.

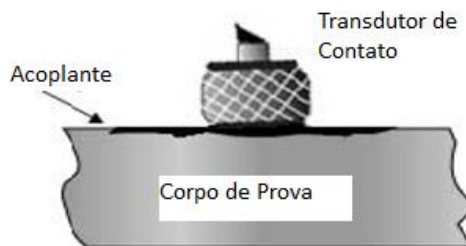


Figura 7 - Inspeção realizada com transdutor de contato [13].

a.2) Transdutores de imersão [11-14]: Estes transdutores são projetados para operar em um ambiente líquido, de forma que não entrem em contato com a peça a ser inspecionada. Frequentemente são empregados em tanques de água, portanto todas as suas conexões são a prova d'água. A figura 8 ilustra a inspeção realizada com esse tipo de transdutor.

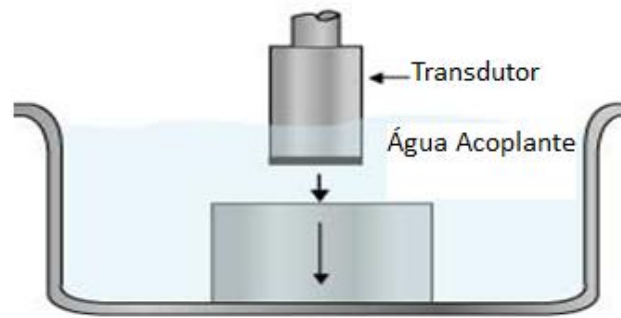


Figura 8 - Inspeção realizada com transdutor de imersão [13].

b) Classificação quanto ao tipo de onda gerada:

b.1) Transdutores retos ou normais [11-14]: são transdutores monocristais que geram ondas longitudinais normais à superfície de acoplamento. Consiste em um cristal piezoelétrico alocado entre uma cunha, paralela à superfície do material em inspeção, e um bloco rígido chamado de amortecedor. A função da cunha é simplesmente de impedir o contato direto do cristal com a superfície do material a ser inspecionado, o que pode danificá-lo. Já o amortecedor é empregado com a finalidade de absorver as vibrações emitidas pela face do cristal com a qual ele entra em contato, de forma que estas sejam direcionadas apenas ao material a ser inspecionado. A figura 9 apresenta a configuração deste transdutor. Assim, o transdutor emite um pulso de onda ultrassônica que atravessa o material em inspeção, reflete nas interfaces e dá origem aos sinais presentes na tela do aparelho.

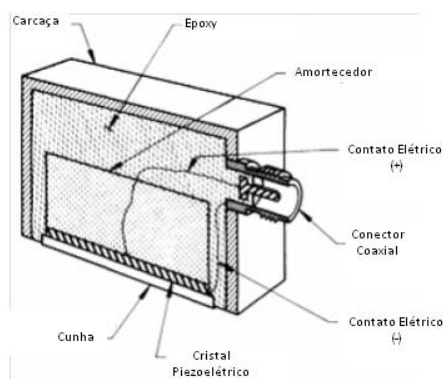


Figura 9 – Transdutor Normal (Adaptado de [12])

b.2) Transdutores angulares [11-14]: são transdutores monocristais que geram ondas transversais à superfície de acoplamento. Possui os mesmos princípios que o transdutor normal, porém, neste caso, a cunha que protege o cristal piezoelétrico possui uma angulação na face que não entra em contato com a superfície do material. A figura 10 ilustra um transdutor angular.

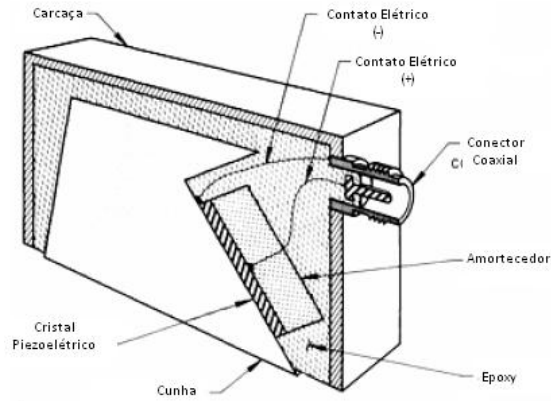


Figura 10 – Transdutor Angular (Adaptado de [12])

b.3) Transdutores Duplo-Cristal [11-14]: Nestes transdutores, dois cristais são incorporados sobre cunhas inclinadas, e assim, apenas um transdutor é necessário para a realização da inspeção. Cada um dos cristais é isoladamente responsável pela emissão e recepção do sinal ultrassônico. A figura 11 apresenta este transdutor.

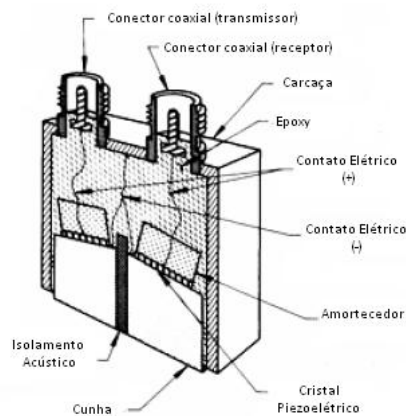


Figura 11 – Transdutor Duplo-Cristal.. (Adaptado de [17])

2.2.6. Inspeção Ultrassônica em Compósitos

A inspeção por ultrassom em materiais compósitos tem sido objeto de estudo de diversos autores no decorrer das últimas décadas. Como estes materiais possuem uma estrutura muito diferente em comparação à dos materiais tradicionais, é importante entender como as ondas ultrassônicas se comportam em seu interior e que tipos de defeitos podem ser detectados através deste ensaio.

Hirse Korn [17] tentou explicar matematicamente a movimentação das ondas no interior de compósitos com o objetivo de diferenciar ligações fortes e fracas entre camadas. Segundo suas pesquisas, as interfaces de defeitos característicos destes materiais, como delaminações e trincas, geram o espalhamento das ondas sônicas e o aparecimento de funções não-lineares e harmônicas que governam a transferência das ondas nas proximidades destas interfaces, indicando, assim, a presença de defeitos nessas regiões [17,18].

A figura 12 ilustra a interação de ondas ultrassônicas com as interfaces de uma delaminação em *wafers* de silício colados.

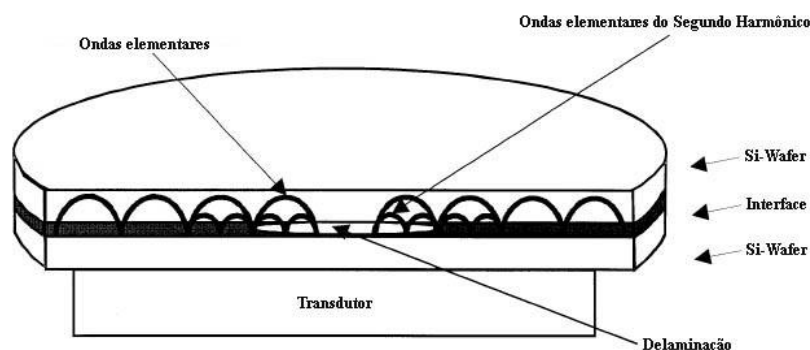


Figura 12 - Interação de ondas ultrassônicas com as interfaces de uma delaminação [18]

O estudo do comportamento das ondas nos compósitos é de suma importância, pois permite a avaliação das propriedades físicas destes materiais e suas relações com a integridade estrutural. O módulo de elasticidade, por exemplo, é uma grandeza extremamente sensível às propriedades estruturais do material [19]. A composição química do compósito afeta diretamente o módulo de elasticidade e este está relacionado com a resistência mecânica do material, permitindo avaliar defeitos relacionados à degradação com o tempo ou ainda a perda de adesão entre camadas; porém, estes defeitos são de difícil detecção com o uso dos métodos já consolidados que se baseiam nos coeficientes de transmissão e reflexão da onda ultrassônica, uma

vez que a interface que os caracteriza pode ser da ordem de micrômetros, muito inferior ao comprimento da onda ultrassônica aplicada [19,20].

Delaminações, vazios, porosidades, trincas, inclusões e áreas pobres ou ricas em resina são defeitos passíveis de serem detectados por ultrassom convencional em compósitos de matriz polimérica [21-23], sendo a detecção de delaminações e trincas os casos estudados mais bem sucedidos na literatura.

Scarponi & Briotti [24] foram capazes de detectar e dimensionar delaminações em diversos compósitos de matriz polimérica aplicando a técnica de reflexão com transdutores de alta frequência (5 e 15MHz), porém, não obtiveram bons resultados em compósitos reforçados por fibra de vidro. Orazio *et al* [25] também obtiveram êxito ao empregar a técnica de reflexão para a detecção de defeitos artificialmente introduzidos no interior dos compósitos estudados, criando, adicionalmente, um procedimento automatizado para a interpretação dos sinais A-scan adquiridos, baseado em redes neurais.

Juntas adesivas têm tido emprego crescente, uma vez que o uso de adesivos proporciona diversas vantagens neste tipo de aplicação, como, por exemplo: a união de materiais dissimilares, distribuição uniforme das tensões na junta, aderência de alta resistência, longa vida em fadiga e proteção contra corrosão [20,23]. Brotherhood *et al* [20] estudaram os tipos de defeitos apresentados por estas juntas, classificando-os em três categorias: defeitos grosseiros, como trincas, vazios e porosidades, que podem ser detectados com ultrassom convencional; baixa coesão, que causa mudanças no módulo de elasticidade do adesivo e pode ser detectada por simples medições de velocidade ultrassônica; e por fim, baixa adesão, o mais difícil de ser detectado pois, como supracitado, este defeito pode ser da ordem de microns.

Brotherhood *et al* [20] tentaram então avaliar a perda de adesão entre camadas de alumínio coladas com adesivo polimérico. A figura 13 apresenta as três configurações diferentes que foram utilizadas para a comparação da propagação de ondas longitudinais, ondas transversais e ultrassom de alta potência neste compósito. Foi concluído que os três métodos permitem a detecção do defeito em estudo, mas ainda precisam de aperfeiçoamento, principalmente o de ondas transversais, que apresentou alto nível de ruídos. Idealmente, tendo em vista níveis de detecção mais altos e confiáveis, é indicada a combinação de mais de um dos métodos.

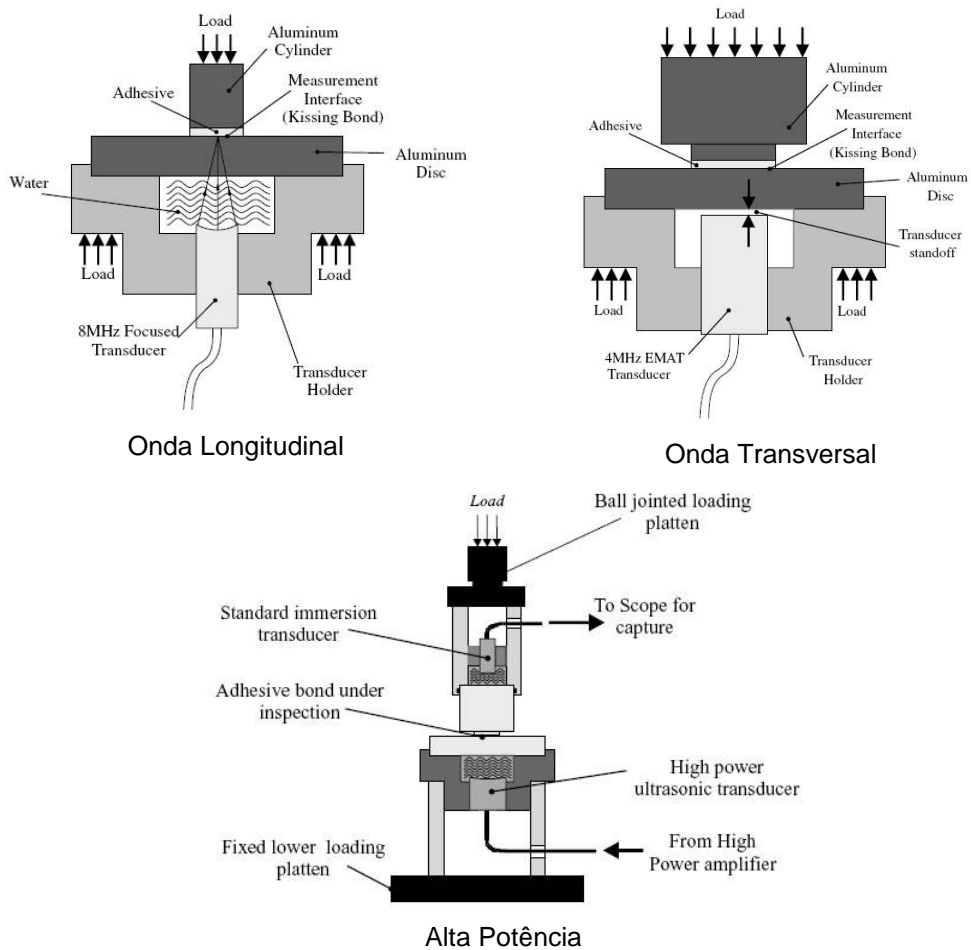


Figura 13 - Métodos para detectar perda de adesão [20]

Tendo em vista a melhoria do emprego da técnica ultrassônica em juntas adesivas utilizadas na indústria automotiva, alguns autores [23,26,27] desenvolveram transdutores e sistemas que operam segundo o método pulso-eco. Robinson *et al* [26], criaram um transdutor que consegue aliar baixa frequência, pequeno diâmetro e baixa divergência. Para que a divergência do feixe não se tornasse um problema, foi desenvolvido um colimador borrachoso, que absorve as reflexões do ultrassom no interior do transdutor, diminuindo o nível de ruído do sinal. A figura 14 apresenta uma ilustração do transdutor.

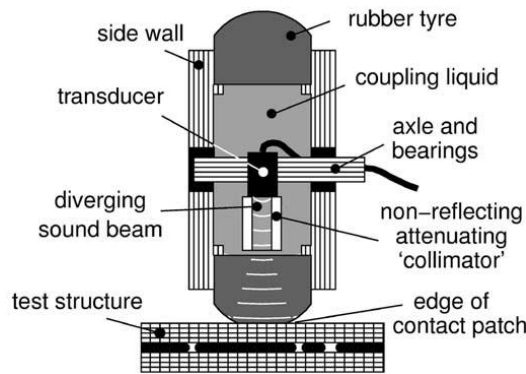


Figura 14 – Transdutor desenvolvido por Robinson et al [26]

Por já ser um dos mais utilizados no ensaio ultrassônico de materiais metálicos, o método pulso-eco é objeto de estudo de muitos pesquisadores que desejam aplicá-lo em materiais compósitos. Mouritz *et al* [28] afirmam que danos por fadiga em estruturas aeroespaciais podem ser detectados por pulso-eco. Em seus trabalhos, foram realizados testes com equipamentos convencionais de ultrassom e foi desenvolvido um corpo-de-prova plástico reforçado com fibra de vidro contendo defeitos de delaminação simulados para tentar generalizar os resultados já obtidos com estruturas aeroespaciais (Figura 15). Tsushima e Ono [29] concluíram que é possível monitorar o início e a propagação de danos em plásticos reforçados com fibra de vidro com a técnica, mas que para caracterizar os defeitos de forma mais completa, seria necessário o emprego de outras técnicas ultrassônicas mais sofisticadas ou outros métodos de ensaios não-destrutivos.

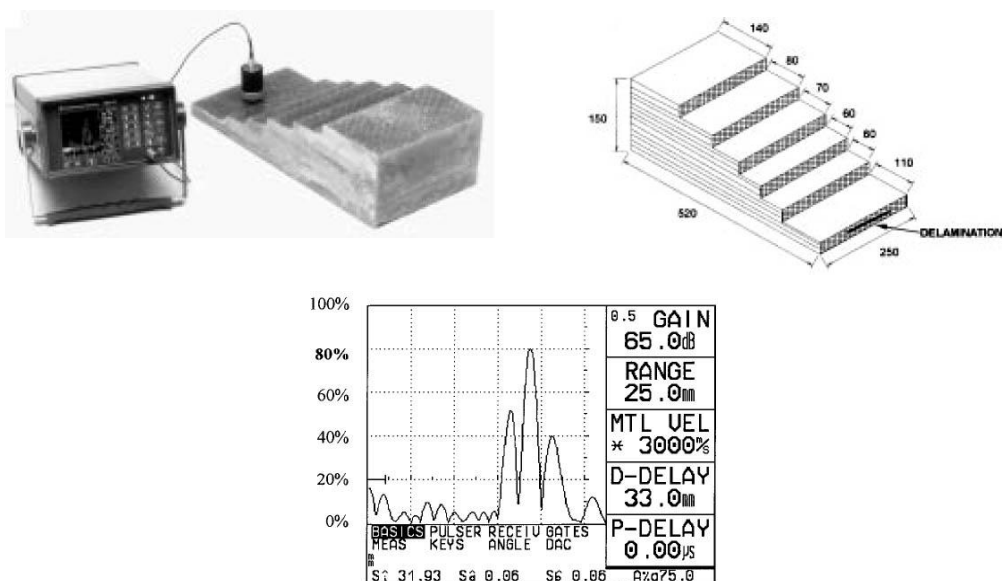


Figura 15 - Equipamento, corpo-de-prova e sinal A-Scan na detecção de delaminação em GRP [28]

Uma metodologia original para a inspeção de compósitos estruturais, baseada na amplitude dos ecos recebidos pelo transdutor e não em seu tempo de atraso, foi proposta por Bastianini *et al* [30]. O estudo foi fundamentado no caso de um substrato de concreto aderido a um polímero reforçado por fibra de vidro. Como estes materiais possuem impedâncias acústicas similares, quando estão perfeitamente aderidos, pequena parte da energia sônica é refletida na interface, ou seja, a maior parte é transmitida de um para o outro. Como uma grande parcela da energia sônica é espalhada no concreto, o sinal retornado ao aparelho de ultrassom é extremamente atenuado. Caso haja algum problema na interface entre esses materiais, como a presença de uma fina camada de ar, grande parte da energia sônica será refletida, devido à grande diferença de impedâncias acústicas. A figura 16 ilustra este fenômeno. Assim, defeitos como vazios e descolamentos foram detectados com sucesso neste compósito e em outros estudados pelos autores.

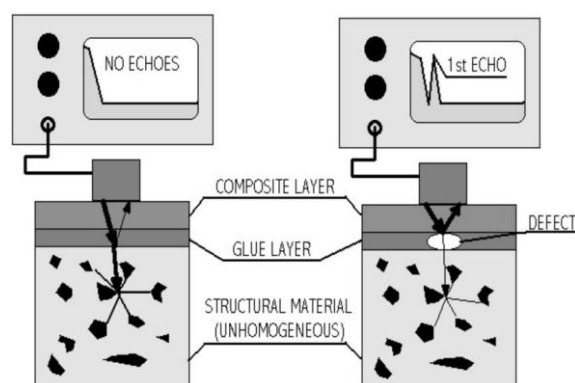


Figura 16 – Comparação entre o comportamento da amplitude do sinal ultrassônico entre camadas perfeitamente aderidas e defeituosas [30]

Uma parcela considerável dos autores consultados desenvolveram suas pesquisas na inspeção ultrassônica convencional em compósitos utilizando transdutores que operam em baixas faixas de frequência, geralmente inferiores a 1MHz. Os resultados apresentados mostram que nestas faixas de frequência o ensaio apresenta menor quantidade de ruídos, além de ser obtida uma maior penetração ao longo da espessura do material com menor atenuação do sinal. Adicionalmente, menores frequências favorecem ensaios realizados em superfícies irregulares e não-planas, algo corriqueiro em materiais compósitos nas suas mais variadas aplicações. Nestes casos, há uma grande perda de sinal quando o eixo do feixe sônico que sai do transdutor não incide de forma normal à superfície da peça a ser inspecionada. Transdutores de baixa frequência possuem menor sensibilidade a esta falta de alinhamento entre a saída do feixe e a superfície, retornando sinais de maior amplitude ao aparelho [26]. A figura 17 ilustra este fenômeno.

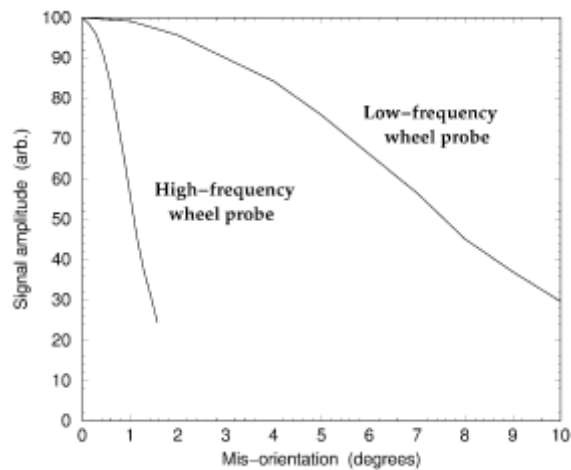


Figura 17 - Efeito do desalinhamento entre o transdutor e a superfície na amplitude refletida. Utilizadas as amplitudes de 10MHz e 500kHz [26]

Imagens C-Scan (Figura 18) com codificações de cores ou tons de cinza podem ser usadas para facilitar a interpretação dos sinais muito atenuados no A-Scan comum, permitindo uma visualização da estrutura segundo um plano xy [22]. Como mencionado previamente, os métodos já estudados se mostraram úteis para detectar danos por impacto, delaminação, porosidades, inclusões e descolamentos entre a fibra e a matriz em vários tipos de compósitos, porém a grande heterogeneidade de propriedades ao longo do material exige a realização de mais estudos no intuito de tornar os métodos mais eficientes e contornar problemas como a da detecção de delaminações em camadas mais profundas, que ficam escondidas por defeitos nas camadas mais superficiais do componente [22].

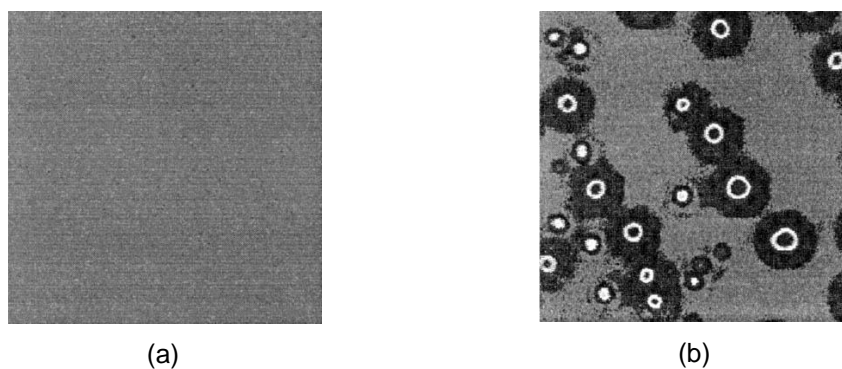


Figura 18 - Exemplos de Imagens C-Scan: (a) *wafers* de silício sem defeitos e (b) descolamentos em *wafers* de silício [18].

Uma alternativa para amenizar as limitações encontradas pelos ensaios não destrutivos na inspeção de compósitos é o emprego de métodos complementares

mais avançados no tratamento dos dados adquiridos. Neste sentido, ferramentas matemáticas e de processamento computacional, como processamento de sinais, são utilizadas na tentativa de detectar e determinar a degradação e envelhecimento do adesivo polimérico e de camadas internas através do ensaio por ultrassom.

As técnicas de processamento de sinais encontradas são, na sua maioria, tentativas de se aumentar a razão sinal/ruído através de algoritmos matemáticos. Já existem diversos filtros capazes de minimizar o ruído eletrônico, aquele inerente aos cabos e circuitos eletrônicos. Porém, segundo Izquierdo *et al* [31], o maior desafio é diminuir a amplitude do ruído estrutural, que advém da reflexão de pequenas imperfeições da estrutura do material que não são consideradas defeitos. Filtros de passa-baixa e gaussianas, largamente utilizados, não são capazes de eliminar o ruído estrutural.

Izquierdo [31] comparou três técnicas de “clareamento” do ruído denominadas inversão de espectro, inversão do modelo paramétrico e inversão da matriz de autocorrelação. A suavização do ruído obtida pode ser visualizada na figura 19, onde se pode confirmar a melhoria, através dos valores da razão sinal/ruído (SNR).

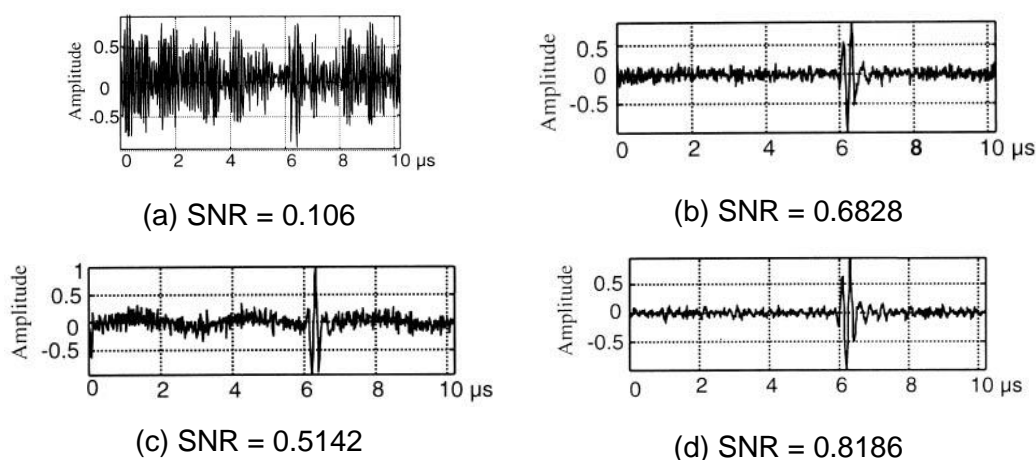


Figura 19 - Métodos de suavização de ruído estrutural: (a) Sinal original; (b) Inversão de espectro (c) Inversão do modelo paramétrico; (d) Inversão da matriz de correlação. [31]

Uma outra forma de suavizar os sinais e aumentar a razão sinal/ruído é o uso de filtros *Wavelet*. Pardo *et al* [32] testaram a aplicação de um grupo de *Wavelets* que não resultam em perda de parte do sinal, através de dois esquemas de algoritmos. Os resultados mostraram que é possível se obter diminuição dos níveis de ruído sem perda de informação relevante analisando separadamente cada método e, principalmente, através da interação dos diversos métodos estudados.

3. Materiais e Métodos

3.1. Corpos de Prova

Juntas do tipo “ponto-e-bolsa” em seções de dutos de matriz epóxi reforçada por fibra de vidro foram utilizadas como objeto de estudo do presente trabalho. O adesivo empregado na união destas juntas é constituído por resina epóxi, sílica cristalina, silicato de cálcio, sílica coloidal amorfa, metanol hidrolisado e fibras de aço inoxidável. Ao todo foram utilizadas 16 seções com defeitos simulados, das quais 12 foram fornecidas pelo fabricante e pertenciam a dutos de 16” de diâmetro e as outras 4, confeccionadas em laboratório, pertenciam a dutos de 4” de diâmetro. As figuras 20 e 21 apresentam os corpos de prova estudados. As tabelas 1 e 2 apresentam as dimensões transversais destes corpos de prova.



(a)



(b)

Figura 20 - Seção de uma junta de 4” confeccionada para o estudo: (a) superfície externa e (b) superfície interna



(a) (b)
 Figura 21 - Seção de uma junta de 16" fornecida pelo fabricante (a) superfície externa e (b) superfície interna

Tabela 1 – Corpo de prova de 4"	
Componente	Dimensão Transversal (mm)
Duto	5
Camada Adesiva	1
Luva Externa	12

Tabela 2 – Corpo de prova de 16"	
Componente	Dimensão Transversal (mm)
Duto Externo	10
Camada Adesiva	1
Duto Interno	10

Adicionalmente, também foram estudadas 6 seções de juntas de 16" consideradas não defeituosas, fornecidas pelo fabricante.

3.2. Defeitos Estudados

Duas classes de defeitos frequentemente observadas em campo nestes dutos compósitos são a falta de adesão entre a camada adesiva e a superfície dos dutos e a falta do adesivo aplicado na união desses. As duas classes de defeito foram estudadas e simuladas nas juntas das seguintes formas:

- Falta de adesivo: Este defeito foi simulado através de duas configurações. A primeira se caracteriza por regiões de variadas geometrias com falta de adesivo, formadas durante a confecção das juntas, quando foi inserida menor quantidade de adesivo do que a indicada nas especificações fornecidas pelo

fabricante, resultando assim em áreas com ausência de adesivo no interior das juntas. Em outra configuração, fitas de um polímero inserido durante a confecção das juntas foram retiradas após a cura da camada adesiva. Conseqüentemente, a junta apresentou em seu interior áreas de geometrias bem definidas com ausência de adesivo. Este defeito está apresentado nas figuras 22 e 23, em todas as suas configurações.

- Falta de adesão: A simulação destes defeitos foi realizada através da inserção de camadas de um polímero diferente do adesivo na junta antes de sua montagem, mantidas após a cura da camada adesiva, representando uma área em que o contato entre o adesivo e a superfície da junta fica impossibilitado. Este defeito está ilustrado nas figuras 22 e 23.

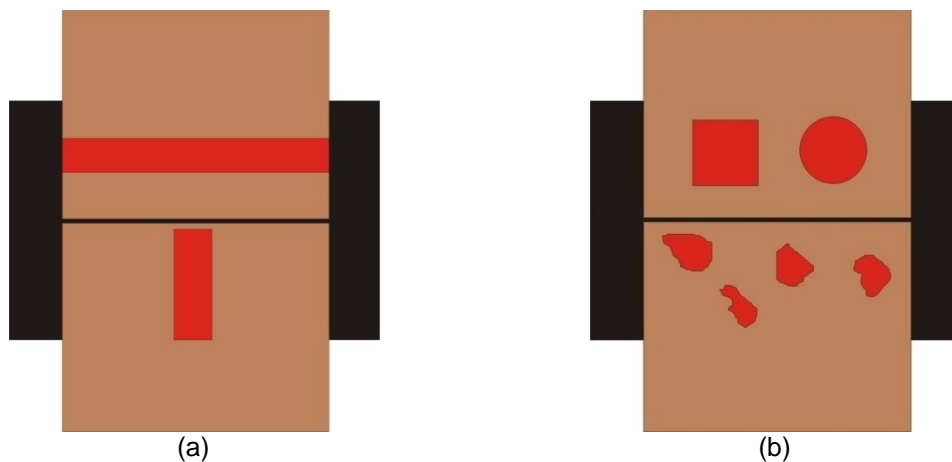


Figura 22 - Esquema representativo dos corpos-de-prova de 4'' e os defeitos inseridos: (a) Falta de Adesão e de Adesivo e (b) Falta de Adesão (acima) e Falta de Adesivo (abaixo)

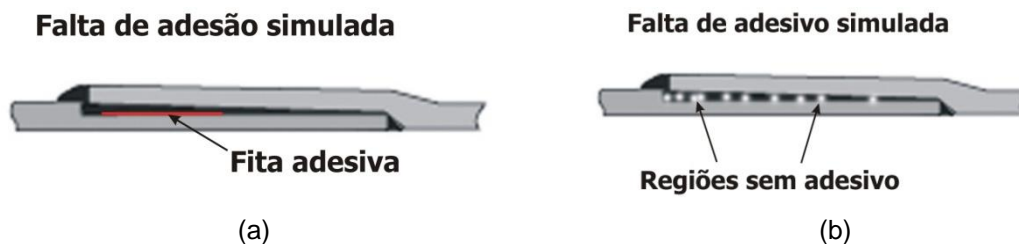


Figura 23 - Representação dos corpos de prova de 16'' e os defeitos inseridos: (a) falta de adesão e (b) falta de adesivo

3.3. Blocos de Referência

Blocos de referência que simulam a estrutura de juntas não-defeituosas foram desenvolvidos para a validação de todo o processo de calibração. Os blocos de referência são específicos para cada tipo de junta, ou seja, obedecem às dimensões transversais destas assim como possuem uma espessura aproximada de sua camada adesiva. A figura 24 apresenta os dois blocos de referência utilizados nas inspeções realizadas.

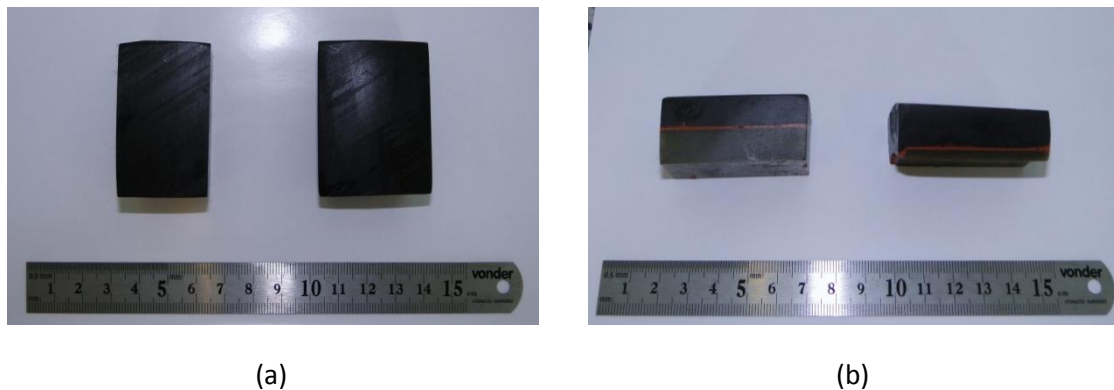


Figura 24 - (a) Blocos de referência utilizados e (b) suas seções transversais.

3.4. Configurações do Ensaio

O equipamento de ultrassom utilizado nos ensaios foi um GE Usip 40. O método ultrassônico utilizado para a inspeção dos corpos de prova foi o de pulso-eco.

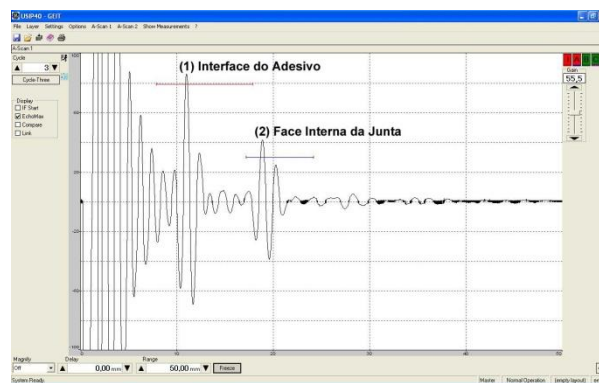
Para ensaios de medição de velocidade sônica e aquisições de sinais A-scan também foi usado um osciloscópio Agilent DSO6043A.

3.4.1. Transdutores

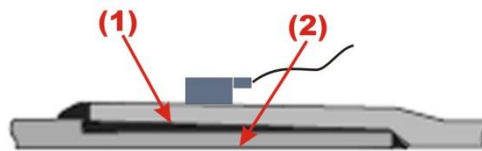
Para a realização dos ensaios foram utilizados transdutores de contato, de ondas longitudinais e transversais. Para possibilitar a passagem do sinal ultrassônico entre o transdutor e a superfície dos corpos de prova, foi empregado óleo como líquido acoplante.

3.4.2. Metodologias testadas

Metodologias de inspeção baseadas nas indicações da interface do adesivo e do fundo da junta que aparecem no sinal A-scan na tela do aparelho de ultrassom foram aplicadas para a tentativa de inspeção do material em questão. A figura 25 apresenta um esquema da localização do transdutor nos corpos de prova durante as inspeções, além de indicar, na junta, as interfaces do adesivo e do fundo da junta que originam os picos aparentes no A-scan.



(a)



(b)

Figura 25 - (a) A-Scan da inspeção de uma junta e (b) transdutor ultrassônico e interfaces que originam os picos.

3.4.2.1. Metodologia 1

O pico relativo à interface do adesivo foi colocado em 100% da tela através de um sinal obtido com o bloco de referência, estipulando-se assim o ganho a ser usado na varredura da junta em estudo. Foram adquiridos todos os valores de ganho (% da tela) para o segundo pico, relativo à face interna da junta, e limiares foram estipulados para distinção entre defeito e não-defeito.

Este método foi aplicado usando as frequências de 1 e 1.6 MHz.

3.4.2.2. Metodologia 2

O pico relativo à face interna da junta (segundo pico) foi elevado a 100% da tela através de um sinal obtido com o bloco de referência. Todas as regiões onde este pico não alcançasse a marca de 50% da tela foram consideradas defeituosas; sinais de valores superiores a 50% eram considerados provenientes de regiões devidamente coladas.

Este método foi aplicado apenas com as frequências de 1 e 1.6 MHz.

3.4.2.3. Metodologia 3

A fim de compensar a probabilidade de acúmulos de erros relacionados aos problemas de acoplamento causados pela superfície curva e rugosa da junta, foi desenvolvida uma metodologia visando minimizar estas influências. O ganho de inspeção foi calibrado utilizando o bloco de referência, de forma a elevar o pico relativo à camada adesiva a 100% da tela. Durante a inspeção foram armazenados os valores de ganho (% da tela) para os dois picos no sinal A-Scan, a fim de se calcular a diferença entre eles, gerando, assim os mapas de cores onde a grande diferença de amplitude entre os dois picos revela uma região defeituosa.

Este método foi aplicado usando as frequências de 1 e 1.6 MHz.

3.4.2.4. Metodologia 4

Nesta metodologia, o segundo pico, relativo à face interna da junta, foi elevado a 80% da tela de acordo com uma indicação obtida com o bloco de referência, estipulando-se assim o ganho a ser usado na varredura de cada corpo de prova. Durante a varredura dos corpos-de-prova, todos os valores da amplitude do segundo pico foram armazenados, e limiares foram estipulados para distinção entre defeito e não-defeito.

Este método foi aplicado apenas com as frequências de 1 e 1,6 MHz.

3.4.3. Varredura dos Corpos de Prova

Uma varredura contínua dos corpos-de-prova se mostrou improvável através das metodologias propostas como consequência da superfície curva e rugosa do material, fatores que prejudicam o acoplamento do transdutor à superfície da junta. Portanto, para garantir um melhor acoplamento, os valores de ganho foram obtidos ponto a ponto, sendo cada ponto obtido equivalente ao diâmetro do transdutor. A figura 26 demonstra a tomada de três pontos em sequência.



Figura 26 – Ilustração da tomada de três pontos consecutivos de acordo com a metodologia aplicada

3.5. Ensaio de Envelhecimento

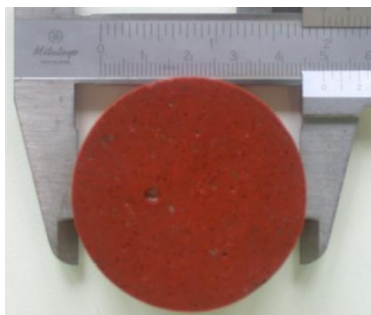
Juntas adesivas constantemente são utilizadas em ambientes agressivos, sendo fatores determinantes para o seu emprego a temperatura de trabalho e absorção de água. A absorção de água em materiais epóxi pode provocar mudanças irreversíveis e altamente prejudiciais às propriedades desse tipo de material. Estudos anteriores já indicaram algumas das mudanças mais apresentadas, que são: 1- perda da adesão entre a resina e seu substrato [33]; 2 – criação de tensões superficiais nas interfaces e adjacências [34]; 3 – diminuição da rigidez e da temperatura de transição vítrea [35]; 4 – criação de microtrincas durante a quebra do material [36].

Ensaio de envelhecimento foram realizados na tentativa de detectar através da técnica ultrassônica alguma mudança estrutural nestes materiais. Um dos métodos mais comuns para a medição de difusão de água e que foi utilizado no presente trabalho, é a avaliação de difusão de água através do volume livre do material governada pela segunda Lei de Fick (equação 2) [34,35], que representa a velocidade de alteração da concentração de soluto em função do tempo e o deslocamento.

$$\left(\frac{dc}{dt}\right)_x = D \left(\frac{d^2c}{dx^2}\right)_x \quad (\text{Equação 2})$$

3.5.1. Corpos de Prova

Doze corpos de prova do adesivo, o mesmo utilizado na união das juntas em estudo, foram confeccionados e curados à temperatura ambiente. Quinze corpos de prova da junta também foram confeccionados a partir de uma junta inteira, que foi cortada para a obtenção dos mesmos. Exemplos de corpos de prova estão apresentados nas figuras 27 e 28. Foram medidas as alturas, com o auxílio de um paquímetro, e as massas iniciais, com o auxílio de uma balança de precisão, de todos os corpos de prova antes da realização dos ensaios.



(a)

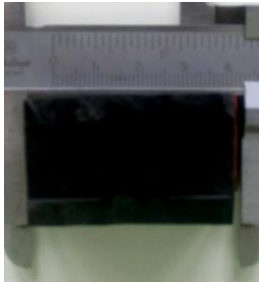


(b)

Figura 27 – (a) Amostra adesiva, (b) sua vista de topo e (c) sua seção transversal



(a)



(b)

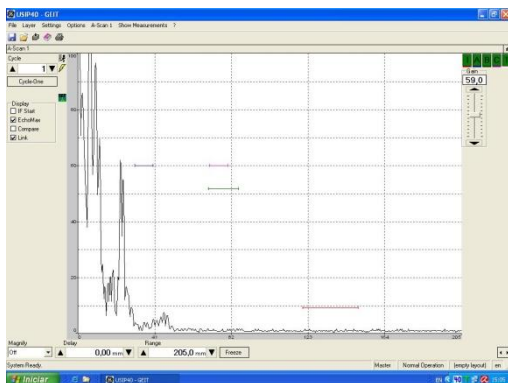


(c)

Figura 28 – (a) Amostra da junta adesiva, (b) sua vista de topo e (c) seção transversal

3.5.2. Medidas das Velocidades Sônicas

Com o objetivo de avaliar o comportamento das ondas ultrassônicas nos corpos de prova ao decorrer dos ensaios, foram obtidos antes da realização dos mesmos, os valores da velocidade sonora de cada corpo de prova. Também foram registrados os sinais ultrassônicos obtidos para que ao final dos ensaios pudessem ser avaliadas possíveis mudanças em sua forma. Foram utilizados para tais aquisições um ultrassom da marca General Electrics, modelo USIP 40, um transdutor de 5MHz da marca Krautkramer, modelo G5KB e um osciloscópio da marca Tektronix, modelo MSO 4034. A figura 29 apresenta o envio do sinal pelo ultrassom ao osciloscópio.



(a)



(b)

Figura 29 – (a) Sinal A-Scan recebido pelo ultrassom e (b) Sinal recebido pelo osciloscópio

3.5.3. Configurações do Ensaio

O ensaio de envelhecimento das amostras foi baseado na norma ASTM – D5229M – 92. As amostras foram colocadas em uma autoclave da marca Cortest Incorporated, e imersas em um banho de água destilada mantido a aproximadamente 60°C durante todo o ensaio. O ensaio foi dividido em 4 períodos de tempo diferentes, sendo adotado que ao final de cada período, seriam retiradas 3 amostras de cada tipo da autoclave. Os tempos de ensaio inicialmente previstos foram de 72 horas (primeiro lote), 120 horas (segundo lote), 240 horas (terceiro lote) e 720 horas (quarto lote), contadas após a inserção das amostras na autoclave.

Logo após a retirada das amostras da autoclave, as mesmas foram secadas e novamente pesadas para a obtenção da variação de massa, se existente. Novos sinais das ondas ultrassônicas também foram obtidos para verificar a variação do comportamento e de valor das mesmas. Todos os resultados deste ensaio de envelhecimento constam no item 4.4.6 deste trabalho.

4. Resultados e Discussão

4.1. Transdutores

Foram testados vários transdutores no intuito de se definir quais teriam melhor comportamento na inspeção dos materiais em estudo. Apenas transdutores longitudinais puderam ser empregados com sucesso. Todos os transdutores de ondas transversais testados não retornaram sinais interpretáveis ao aparelho de ultrassom e, portanto, o seu uso foi descartado.

Transdutores de frequências superiores a 3 MHz apresentaram elevado nível de ruídos e não foram capazes de atravessar toda a espessura das juntas, não retornando sinais inteligíveis (Figura 30 (a)). O transdutor Krautkramer MSWQC, série Gamma de 2.25 MHz foi o de maior frequência que foi capaz de retornar algum sinal interpretável (Figura 30(b)), porém, ainda apresentou uma baixa relação sinal-ruído, resultando em sinais de baixa estabilidade.

Dois transdutores obtiveram resultados satisfatórios, transmitindo sinais estáveis e de boa relação sinal-ruído. Foram estes: Krautkramer KBA de 1MHz e Imasonic, série IM 1626, de 1,6MHz, sendo este o mais empregado para a realização dos ensaios. A figura 30 apresenta a comparação entre 3 frequências de inspeção testadas.

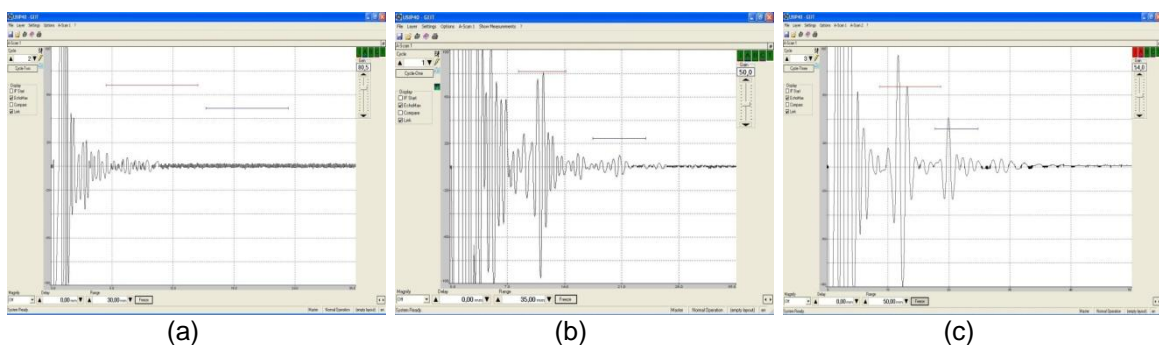


Figura 30 - Comparativo entre sinais A-scan nas frequências de (a) 5MHz, (b) 2.25MHz e (c) 1MHz

4.2. Caracterização de Regiões Defeituosas

Nos ensaios realizados no presente trabalho, a interpretação dos resultados foi baseada na leitura dos sinais A-scan presentes na tela do aparelho de ultrassom. Caso a região inspecionada não possua defeitos, é possível observar no sinal obtido dois picos: o primeiro relativo à interface do adesivo e o segundo relativo à face interna da junta. Caso haja algum defeito, o segundo pico é inexistente ou aparece extremamente atenuado, uma vez que a presença de vazios ou algum material estranho à estrutura impede a passagem do sinal ultrassônico através de toda a espessura da junta. A figura 31 apresenta um comparativo entre os sinais supracitados.

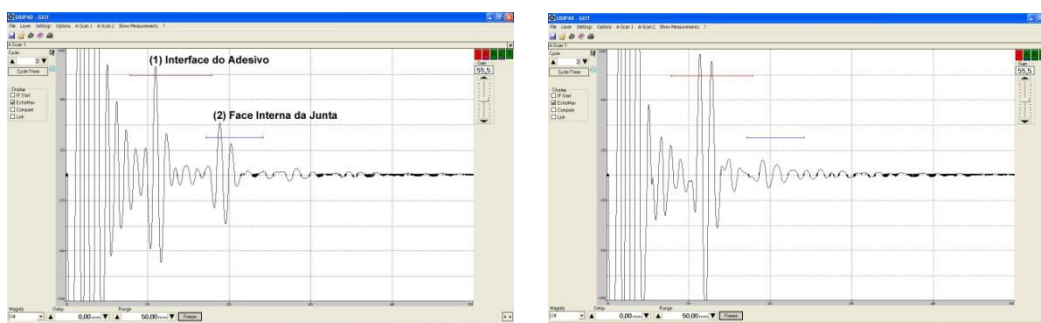


Figura 31 – Sinais A-Scan de regiões (a) devidamente coladas e (b) defeituosas

4.3. Determinação da Velocidade Ultrassônica

Através de uma saída não retificada do aparelho GE USIP-40, foi possível enviar o sinal A-scan para um osciloscópio Angilent DSO6043A e fazer medições de tempo entre as indicações de espessuras fornecidas pelo aparelho de ultrassom, permitindo determinar a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas nos materiais em estudo.

Foram realizadas diversas medidas de velocidade ultrassônica em variados pontos das juntas, tendo em vista a obtenção de um valor médio. Nas regiões das juntas onde não há presença de adesivo, apenas epóxi com fibra de vidro, as médias das velocidades encontradas em cada camada foram de 3412.71 m/s e 3547.30 m/s, resultando em uma média global de 3480 m/s. A figura 32 traz um desenho esquemático mostrando as regiões onde foram feitas as medições referidas onde (1) e (2) são os transdutores KrautKramer KBA de 1 MHz.



Figura 32 - Localização das regiões de medição de velocidade do som sem a presença de adesivo

Foram confeccionados em laboratório corpos de prova com os adesivos a fim de determinar a velocidade de propagação apenas neste meio (Figura 33). As indicações, no adesivo, são extremamente difíceis de serem obtidas devido às suas características muito atenuantes.

Foram feitas algumas medições do adesivo chegando a um valor de velocidade de propagação de 2139,10 m/s. Este valor é a média entre duas indicações obtidas em cada um dos corpos de prova confeccionados. A alta porosidade tornou impossível localizar uma maior quantidade de regiões onde se pudesse adquirir sinais interpretáveis.



Figura 33 - (a) Corpos de prova do adesivo e (b) medição da velocidade do som com transdutor de 1 MHz e sapata acrílica

Utilizando-se a velocidade obtida nas regiões com ausência de adesivo e a velocidade obtida nos corpos de prova contendo apenas adesivo, a velocidade de propagação do ultrassom na junta foi definida como a média das duas indicações obtidas para cada camada da mesma: 3033,04 m/s. Este valor ao ser introduzido nas configurações do aparelho e testado considerando-se o atraso temporal dos picos presentes na tela (escala horizontal do sinal A-scan) resultou em indicações de

espessura muito próximas das reais, demonstrando ser um valor adequado para os ensaios.

4.4. Determinação do Ganho de Inspeção

O ganho de inspeção é obtido a partir de sinais aquisitados no bloco de referência. Busca-se com o transdutor devidamente acoplado à superfície do bloco, o ponto no qual o sinal ultrassônico se apresente de forma mais clara, com maior amplitude e que apresente a melhor relação sinal-ruído. Não são utilizadas regiões próximas às extremidades do bloco de referência para tal, é necessário que o sinal seja obtido a partir de regiões tão centrais quanto possíveis para minimizar os efeitos de interferência de borda.

Uma vez obtido o sinal mais claro, o ganho de inspeção (em dBs) a ser utilizado será função da metodologia empregada para a inspeção do material.

4.4.1. Mapeamento das Juntas

Após o mapeamento das juntas segundo metodologias apresentadas no item 3.4.2 do presente trabalho, a partir dos sinais A-scan registrados, mapas C-scan da estrutura da camada adesiva foram compostos com o auxílio de um software de modelagem matemática, estipulando limiares característicos de cada metodologia para distinção entre defeito e não-defeito.

A seguir estarão apresentados os resultados referentes a cada metodologia empregada, assim como alguns dos mapas C-scan obtidos. A identificação dos corpos de prova constará nas legendas de cada figura. As palavras “Adesão” ou “Adesivo”, presentes antes da numeração de cada corpo de prova, indicam qual é a classe de defeito simulada neste.

4.4.1.1. Metodologia 1

Considerando-se, no A-scan, o pico relativo à interface da junta (segundo pico), foi adotado que na escala dos mapas, valores de ganho inferiores a 35% seriam

considerados regiões defeituosas, valores entre 35 e 40% seriam considerados regiões de transição, ou seja, podem ou não ser regiões defeituosas e necessitam de análise mais criteriosa, e valores acima de 40% seriam considerados regiões não-defeituosas. A figura 35 mostra os resultados para juntas com ambos os defeitos. A figura 34 traz ainda uma foto da região inspecionada a fim de mostrar a orientação dos mapas e correta localização dos defeitos.

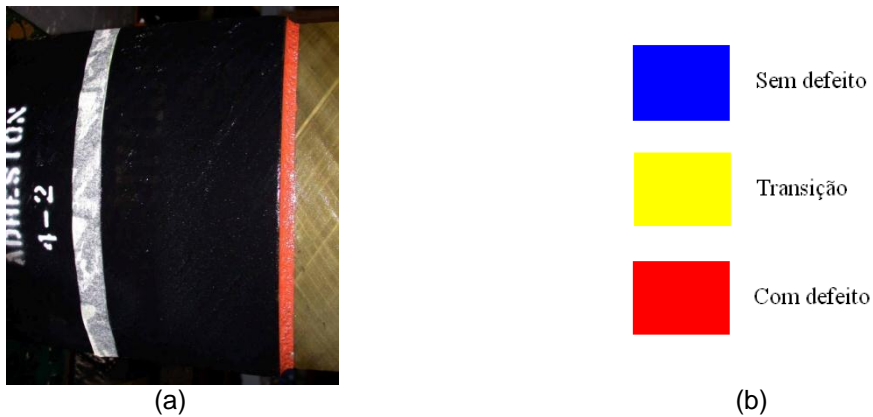
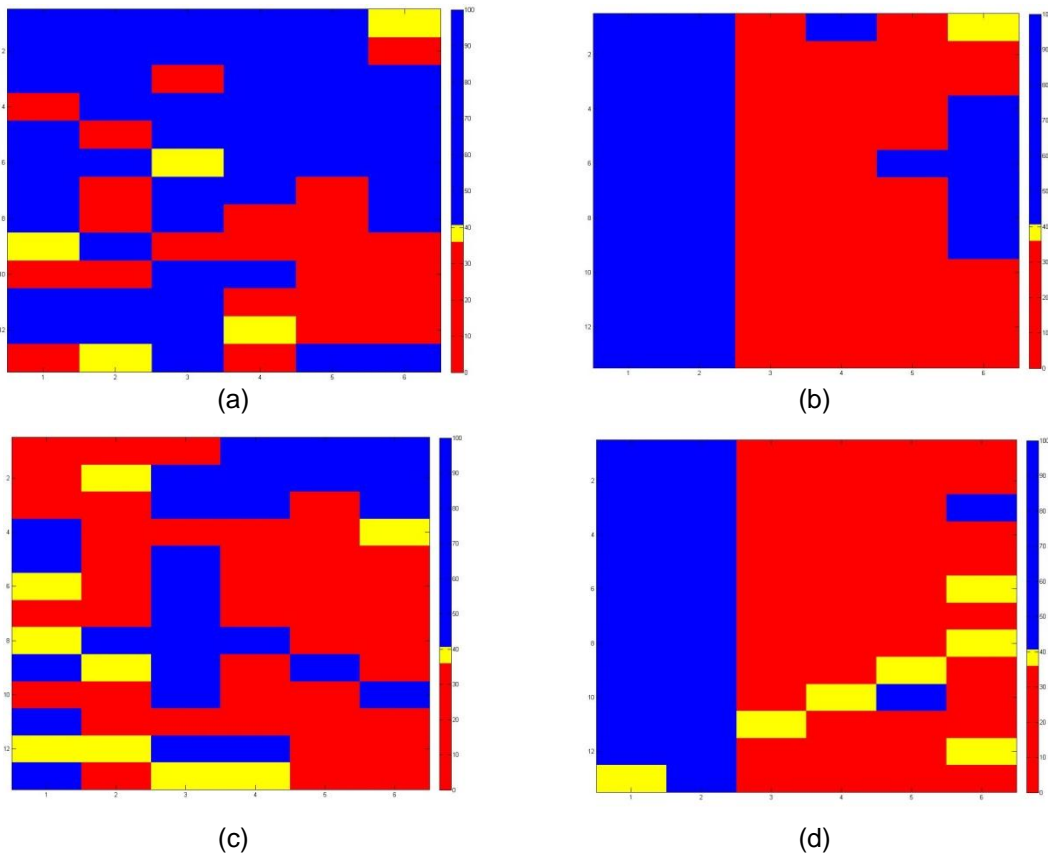


Figura 34 - (a) foto do corpo de prova – região de interesse entre a fita branca e o adesivo vermelho (b) legenda para todos os mapas subsequentes.



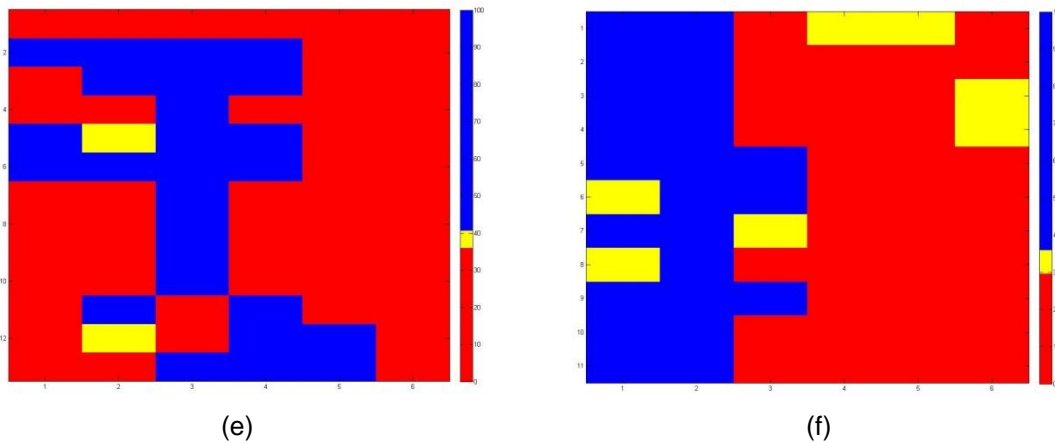


Figura 35 - Mapeamento dos CPS de 16" de diâmetro: (a) Adesivo 8-1 (b) Adesão 4-2, (c) Adesivo 8-2, (d) Adesão 4-3, (e) Adesivo 8-3 e (f) Adesão 4-5.

Todos os resultados demonstrados acima foram obtidos com as frequências de 1 e 1.6 MHz. O transdutor de 2,25MHz não foi capaz de retornar ao aparelho os valores do segundo pico proveniente da face interna da junta. Grande parte destes picos apresentou amplitude muito baixa, resultando em mapas que consideram a junta completamente defeituosa, mesmo com ganhos extremamente altos, situação que não condiz com a realidade e que comprova que o aumento da frequência compromete os resultados de inspeção para estes tipos de materiais. A figura 36 mostra os sinais A-scan para esta frequência, onde se pode notar o elevado ganho de varredura aplicado e a baixíssima amplitude dos picos. Este comportamento se repetiu em todos os métodos e, em consequência disto, apenas os mapas dos ensaios com transdutores de 1 e 1.6 MHz serão mostrados.

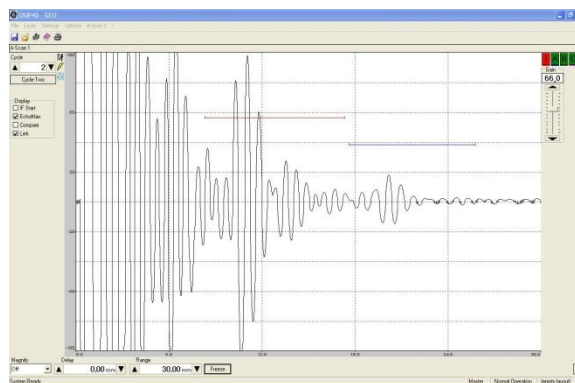


Figura 36 - Sinal A-scan de uma junta sem defeito com o transdutor de 2.25 MHz – nota-se o elevado ganho e a baixa amplitude dos picos relativos ao adesivo e a face interna da junta.

É possível observar nos mapas construídos após as inspeções com esta metodologia que seus resultados a priori aparentam ser promissores, uma vez que foram evidenciadas excentricidades características de cada classe de defeito estudada. Os mapas referentes aos corpos de prova com o defeito de falta de adesivo simulado, por exemplo, indicam grandes áreas com ausência ou presença de defeitos, fato condizente com a forma como este defeito foi simulado, indicando, portanto, que existem áreas com ausência e presença da camada adesiva. Os mapas dos corpos de prova com falta de adesão, por sua vez, apontam uma extensa área defeituosa exatamente onde se localiza a fita inserida para impedir o contato entre a camada adesiva e a superfície das juntas, indicando que a metodologia 1 também é adequada na detecção da classe de defeito em questão.

4.4.1.2. Metodologia 2

Os mapas obtidos nesta metodologia foram semelhantes aos obtidos com a metodologia 1. Aqui, mais uma vez a frequência de 2.25MHz falhou, não sendo possível obter nenhuma indicação acima dos 50%, requisito para a região ser considerada devidamente colada. A figura 37 mostra alguns resultados obtidos para esta técnica com o transdutor de 1MHz.

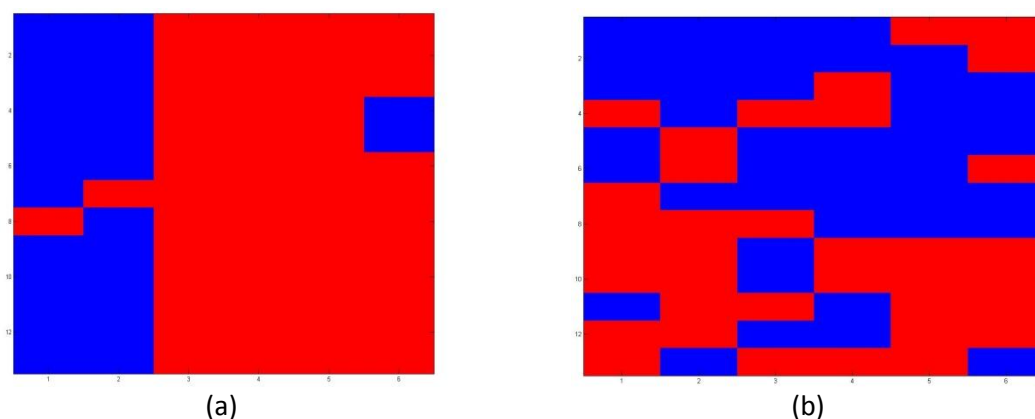


Figura 37 - Mapeamento dos CPS (a) Adesão 4-2 e (b) Adesivo 8-1 pela metodologia 2.

Apesar de possuir resultados semelhantes aos apresentados pela metodologia 1, evidenciando as características esperadas para cada classe de defeitos, esta metodologia foi considerada menos precisa do que a precedente. A necessidade de que o segundo sinal atinja pelo menos 50% da tela pode se tornar um fator de superdimensionamento das áreas defeituosas. Muitas regiões apresentaram valores de ganho próximos a 50% da tela, ainda que fossem inferiores. Considerando-se que

a atenuação do sinal também deve ser atribuída à dificuldade de um devido acoplamento entre o transdutor e a superfície irregular e curva da junta, além das características atenuantes do próprio material, há uma propagação de imprecisões nas medidas que acabam por comprometer a validade da metodologia em questão.

4.4.1.3. Metodologia 3

De posse dos valores de ganho dos picos provenientes da camada adesiva e da face interna da junta, foram calculadas as diferenças entre estes valores para cada região. Nestes mapas, um local onde a diferença entre os dois picos é superior a 55% é considerado defeituoso, enquanto quando esta diferença é inferior a 50% o local é considerado livre de defeitos. A figura 38 apresenta os mapas para este caso.

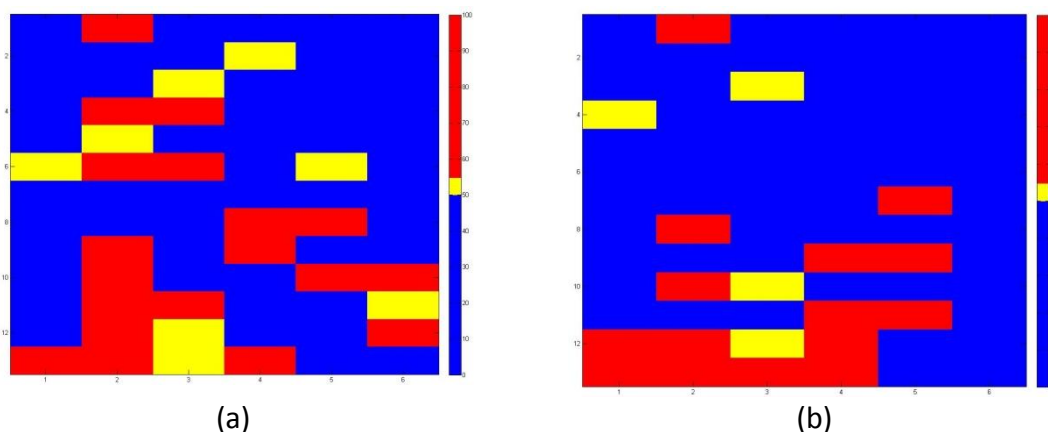


Figura 38 - Mapeamento dos CPs (a) Adesão 4-2 e (b) Adesivo 8-1 pelo método 3

Como é possível observar nos mapas da figura 38, esta metodologia se mostrou ineficaz em detectar os defeitos propostos. Enquanto as duas primeiras metodologias apresentaram resultados similares, na metodologia em questão nenhum mapa apresentou as configurações esperadas para ambas as classes de defeitos e, portanto, essa foi descartada para o decorrer do trabalho.

4.4.1.4. Metodologia 4

Os mapas de cores desta metodologia foram traçados a partir dos valores de ganho registrados relativos à face interna da junta. Na escala dos mapas, valores de ganho inferiores a 35% foram considerados regiões defeituosas, valores entre 35 e 40% foram considerados regiões de transição, ou seja, podem ou não ser regiões

defeituosas e necessitam de análise mais criteriosa, e valores acima de 40% foram considerados regiões não-defeituosas. As figuras 39 e 40 apresentam os mapas obtidos nesta metodologia.

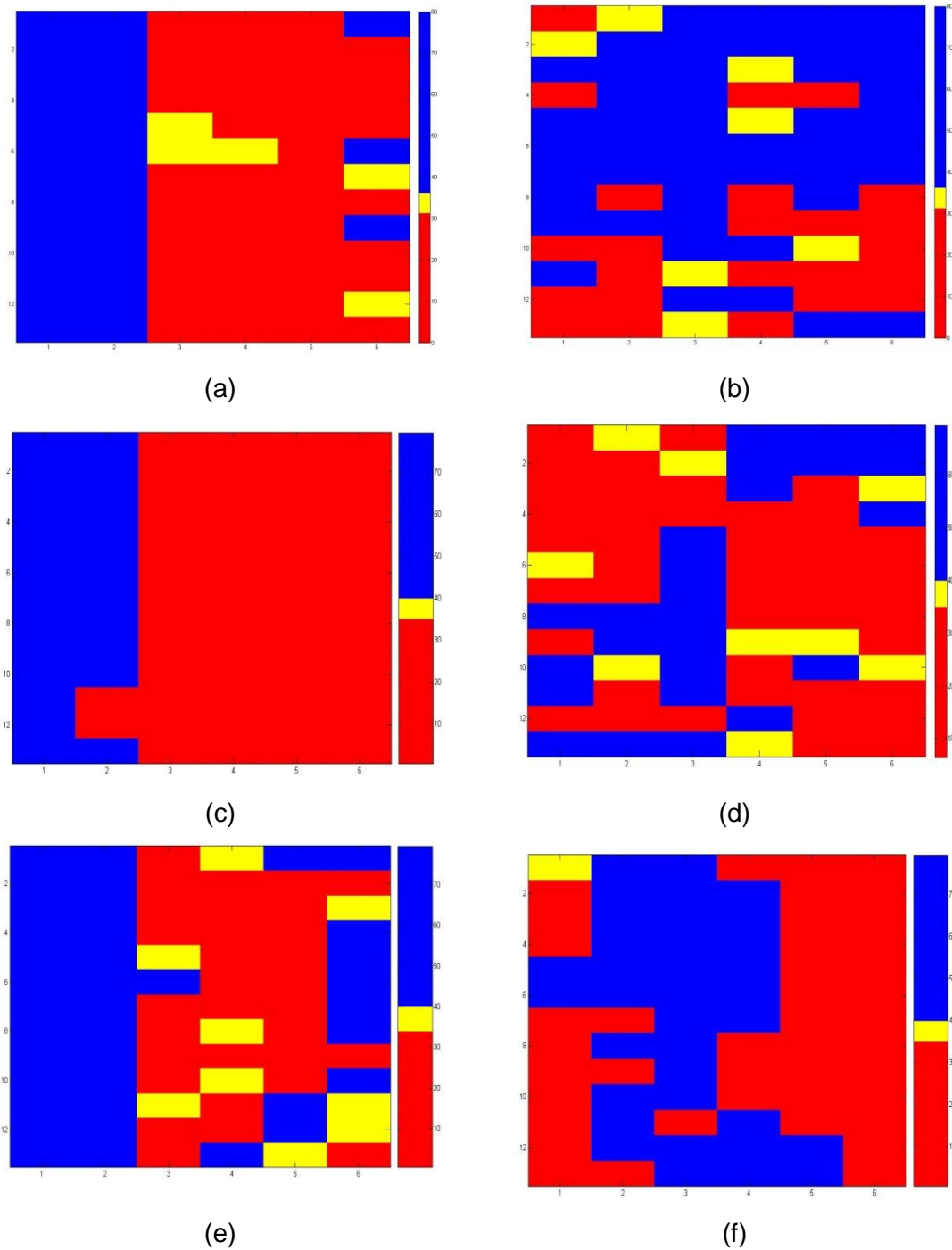
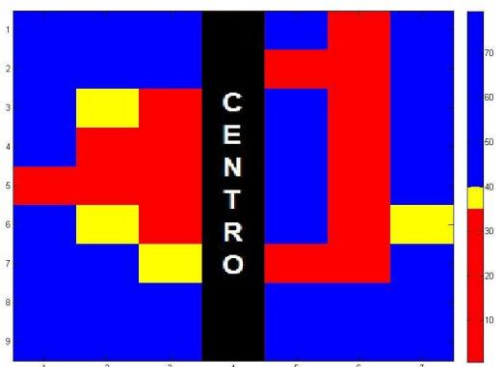


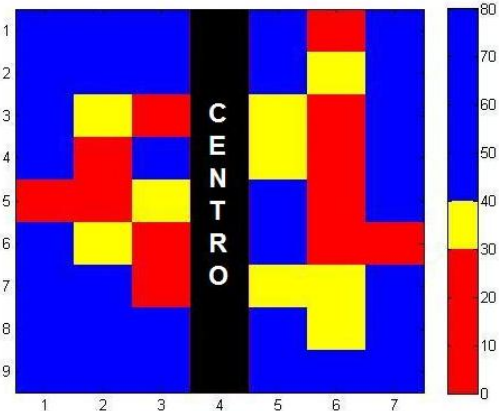
Figura 39 - Mapeamento dos CPS de 16'' de diâmetro pela metodologia 4: (a) Adesão 4-1, (b) Adesivo 8-1, (c) Adesão 3-4, (d) Adesivo 8-2, (e) Adesão 4-2 e (f) Adesivo 8-3



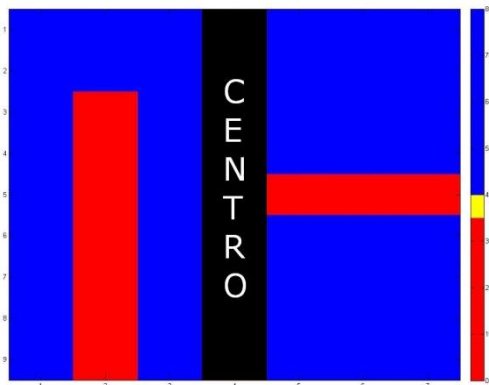
(a)



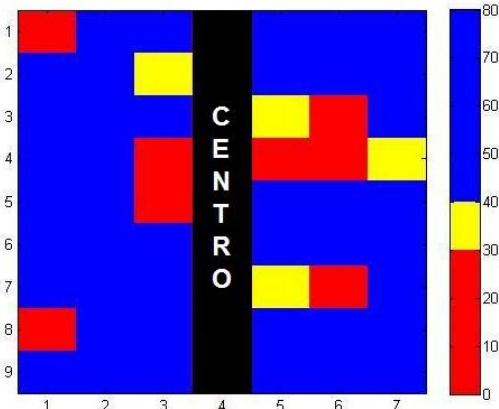
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 40 - Mapeamento dos CPS de 4" de diâmetro pela metodologia 4: (a) orientação dos mapas, (b) Adesivo Junta 1, (c) Adesão Junta 2, (d) Adesivo Junta 3 e (e) Adesivo (esquerda) e Adesão (direita) Junta 4

Esta metodologia obteve resultados bastante semelhantes aos já apresentados pela metodologia 1, como pode ser notado na comparação entre as figuras 35 e 39. Assim como a primeira, esta metodologia foi considerada adequada para a detecção dos defeitos propostos.

Como é possível observar na figura 40, os mapas obtidos para todas as juntas de 4" apresentam indicativos de defeitos em ambos os lados, como esperado. As indicações de defeitos se encontram tanto em áreas próximas às que as fitas foram

inseridas, como também apresentam as orientações em que as mesmas foram dispostas (vertical e horizontal).

A Junta 4 também apresentou indicação de áreas defeituosas em ambos os lados. No mapa em questão, o lado direito ao centro da junta corresponde aos defeitos de falta de adesão e o lado esquerdo corresponde à falta de adesivo. Pelo lado direito, há a indicação de duas regiões defeituosas em áreas próximas às que o acetato foi inserido. Já pelo lado esquerdo, há indicação de regiões defeituosas somente nas extremidades da junta e apenas o corte para a avaliação da real estrutura da junta pode assegurar a precisão do resultado obtido.

Alguns corpos de prova apresentaram indicativos de defeitos em regiões em que não era esperada a presença dos mesmos, porém, em sua maioria, localizados próximos às extremidades das juntas. Isso pode ser consequência do espalhamento que o feixe ultrassônico pode sofrer quando direcionado a áreas próximas às extremidades, gerando reflexões da borda da junta.

4.4.2. Preparo Superficial

A curvatura e a rugosidade superficial comuns a todos os corpos de prova resultam em uma grande dificuldade de inspeção, pois frente a estas características o completo acoplamento do transdutor à superfície do material se torna prejudicado em diversas regiões. Esta dificuldade pode comprometer a validade dos resultados obtidos, uma vez que certa parte da energia sônica fornecida pelo transdutor é perdida em decorrência da falta de alinhamento entre o eixo do feixe sônico e a direção normal à superfície curva [26].

Para efeito de comparação, a Junta 1, de 4", foi inspecionada duas vezes. A primeira inspeção se deu nesta junta com a superfície ainda rugosa, ou seja, com as mesmas características dos corpos de prova anteriores. Após a primeira inspeção, a superfície da Junta 1 foi lixada para a obtenção de uma superfície mais homogênea, livre tanto quanto o possível de irregularidades superficiais e novamente inspecionada. Com o auxílio de um estereoscópio Zeiss, foi possível comparar o estado da camada superficial do corpo de prova antes e após o lixamento. A partir da figura 41(a), pode-se observar a magnitude da irregularidade superficial previamente ao lixamento, que alcança em alguns pontos 1.8mm de altura. Os mapas de cores obtidos em ambas as inspeções estão apresentados na figura 42.

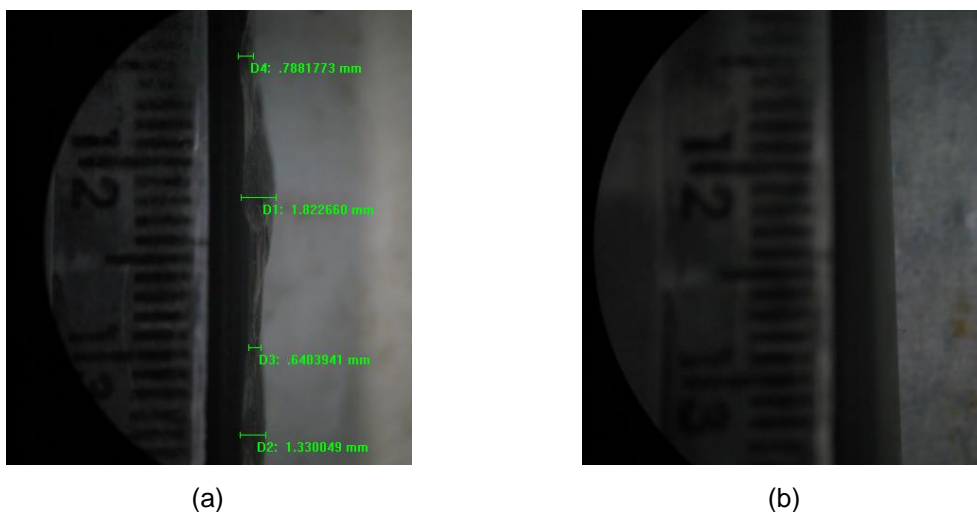


Figura 41- Comparação entre a superfície de um corpo de prova (a) sem lixamento e (b) após lixamento.

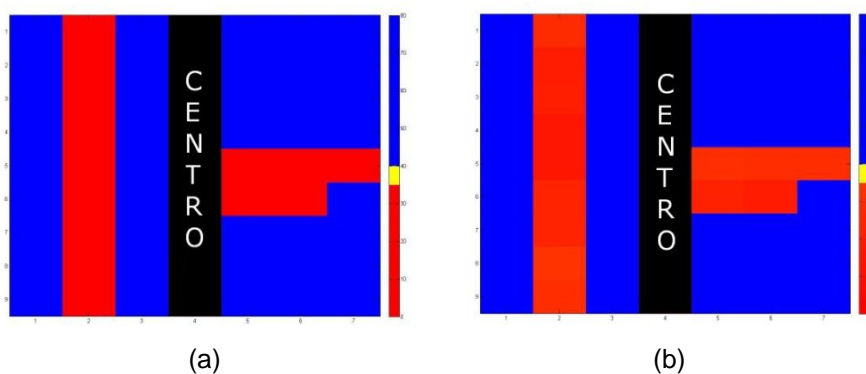


Figura 42 – Junta 1 (a) como recebida e (b) lixada

Como é possível observar, os dois resultados obtidos foram equivalentes. Porém, após o lixamento, o acoplamento do transdutor ao corpo de prova se deu de forma mais fácil, tornando a inspeção mais rápida e confiável, apresentando sinais mais claros e com a necessidade de menor quantidade de fluido acoplante.

4.4.3. Sensibilidade do Ensaio

Como disposto no item 2.2.5.3 do presente trabalho, é possível calcular a sensibilidade teórica do ensaio através da relação apresentada pela equação 1:

(Equação 1)

Assim, para a velocidade de 3033,04m/s, calculada para a estrutura do material em questão, e de posse das frequências utilizadas para a realização dos ensaios, as sensibilidades teóricas calculadas para cada qual está apresentada na tabela 3.

Frequência (MHz)	Sensibilidade Aproximada (mm)
1	3
1.6	2

Segundo literatura consultada [14] descontinuidades apenas são detectáveis quando possuem dimensões superiores a $1,5\lambda$. Portanto, a partir da tabela 3, infere-se que descontinuidades de dimensões inferiores a 4,5mm não são detectadas pelo transdutor de 1MHz, assim como descontinuidades de dimensões inferiores a 3mm não são detectadas pelo transdutor de 1.6MHz

4.4.4. Traçagem da Abertura do Feixe Sônico

Como discutido na seção 3.4.3, a varredura dos corpos de prova foi realizada de ponto em ponto, sendo cada ponto equivalente ao diâmetro do transdutor utilizado nos ensaios. Tendo em vista uma melhor avaliação dos resultados, foi traçada a abertura do feixe sônico do transdutor de 1.6MHz, empregado em grande parte das inspeções realizadas neste trabalho. Sabendo-se o comportamento do feixe sônico, é possível inferir-se a área que este realmente cobre a qualquer profundidade do material em estudo. No presente projeto, é de interesse especial o conhecimento da área coberta pelo feixe sônico na profundidade correspondente à localização da camada adesiva, ou seja, a aproximadamente 10mm da superfície do corpo de prova.

Para a traçagem, foi utilizado um método simples, conhecido como “Método dos 6dBs”, amplamente utilizado para o dimensionamento de descontinuidades em ensaios ultrassônicos. Uma explicação detalhada do método em questão pode ser encontrada em [14]. A traçagem foi realizada em um bloco de aço carbono, de onde foi obtido que a 10mm de profundidade o feixe sônico ocupa uma distância de 9mm, ou seja, cobre uma área de aproximadamente $0,64\text{cm}^2$.

4.4.5. Corte das Juntas

Para a verificação da adequação entre os critérios de aceitação utilizados nas metodologias mais promissoras e a sensibilidade dos ensaios, foram selecionados 6 corpos-de-prova de 16", que após serem inspecionados seguiram para o corte em serra de fita para que fosse possível a inspeção visual e a confirmação dos resultados obtidos. O corte foi conduzido nas seguintes configurações:

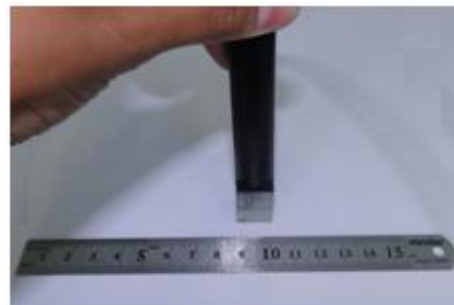
a) Separação das superfícies dos corpos de prova Sem Defeito 2-2, Adesão 4-2 e Adesivo 8-2 em 78 partes diferentes, cada qual relativa a um ponto de contato entre o transdutor e a superfície da junta. A figura 43 apresenta o aspecto de um dos corpos de prova após este corte. As figuras 44 a 46 apresentam a comparação entre os resultados das inspeções ultrassônicas e o observado visualmente.

b) Separação da superfície dos corpos de prova Sem Defeito 2-3, Adesão 4-3 e Adesivo 8-3 de forma que cada parte cortada tenha as dimensões de 10mm x 10mm, resultando na divisão da superfície da junta em 189 partes diferentes. As figuras 47 a 49 apresentam a comparação entre os resultados.

Nos mapas reais, regiões vermelhas indicam que nestas foi verificada a presença de um ou mais vazios de extensão superior a 2mm na camada adesiva; regiões amarelas indicam que foi verificada a presença de mais de um vazio de extensão aproximada de 2mm na camada adesiva; e, por fim, regiões azuis indicam que foi verificada a ausência de vazios, ou apenas a presença de vazios de extensão inferiores a 2mm. Nos mapas referentes aos corpos de prova com falta de adesão, regiões vermelhas consideram ainda a presença da fita que impede o contato direto entre a junta e a camada adesiva.



(a)



(b)

Figura 43 – (a) Corpo-de-prova após o corte e (b) a relação de cada parte cortada com o diâmetro do transdutor

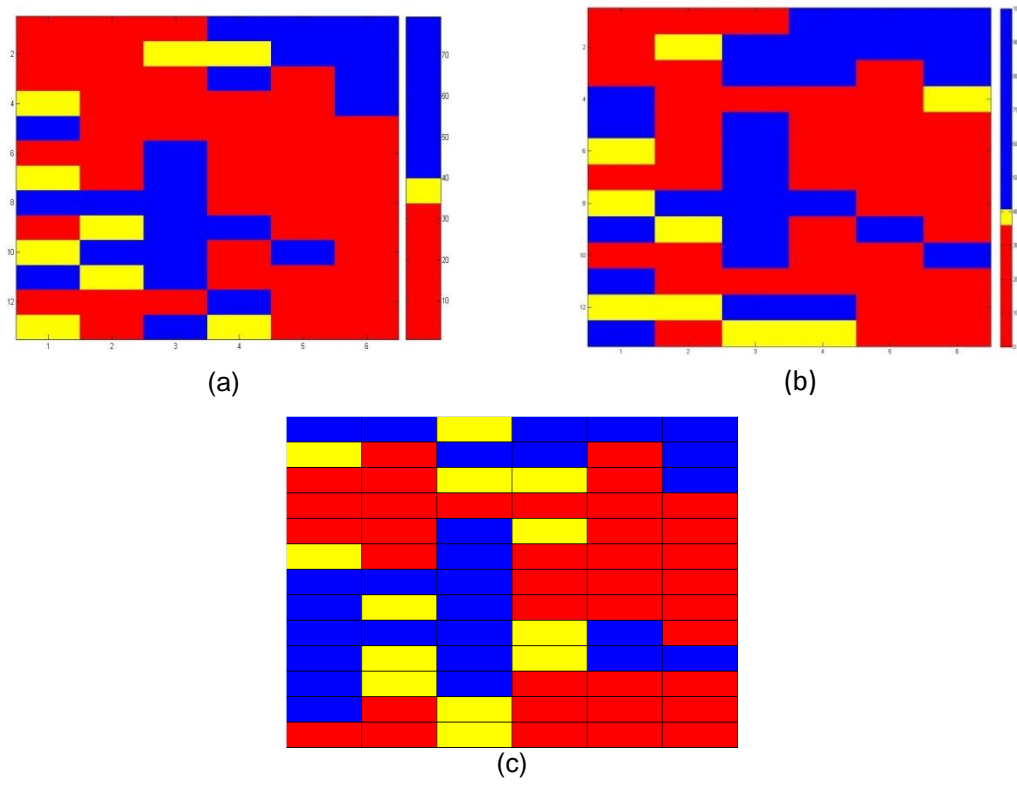


Figura 44 – Mapas C-Scan do corpo de prova Adesivo 8-2: (a) inspeção ultrassônica através da metodologia 4, (b) inspeção ultrassônica através da metodologia 1 e (c) inspeção visual após corte

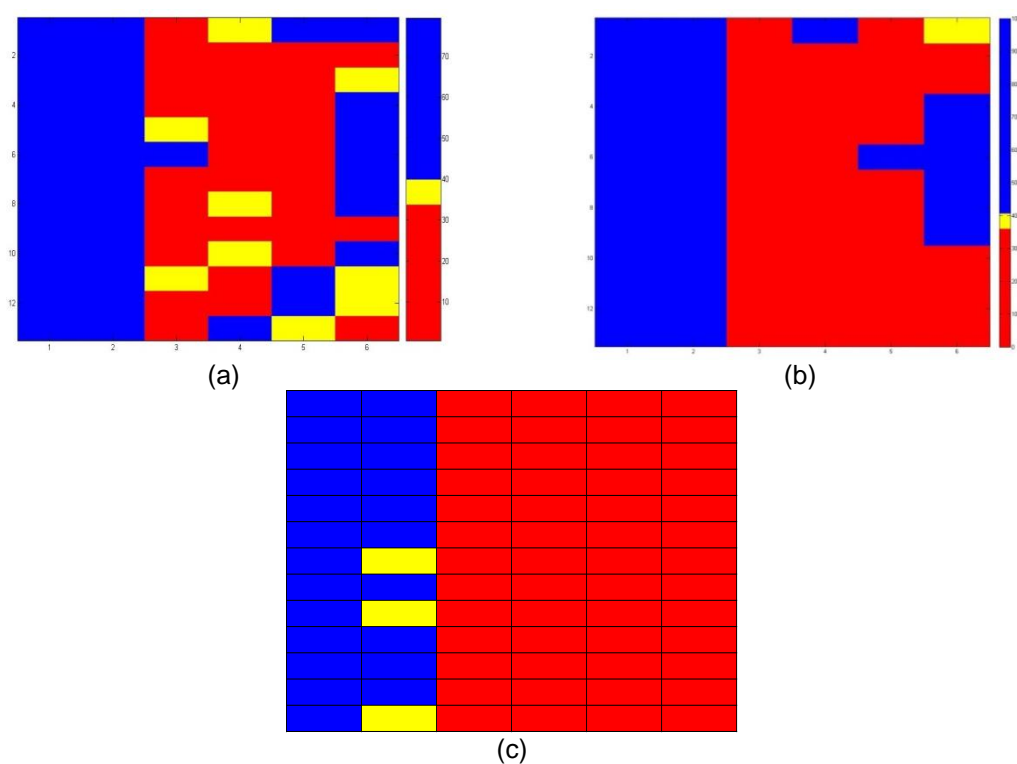


Figura 45 – Mapas C-Scan do corpo de prova Adesão 4-2: (a) inspeção ultrassônica através da metodologia 4, (b) inspeção ultrassônica através da metodologia 1 e (c) inspeção visual após corte

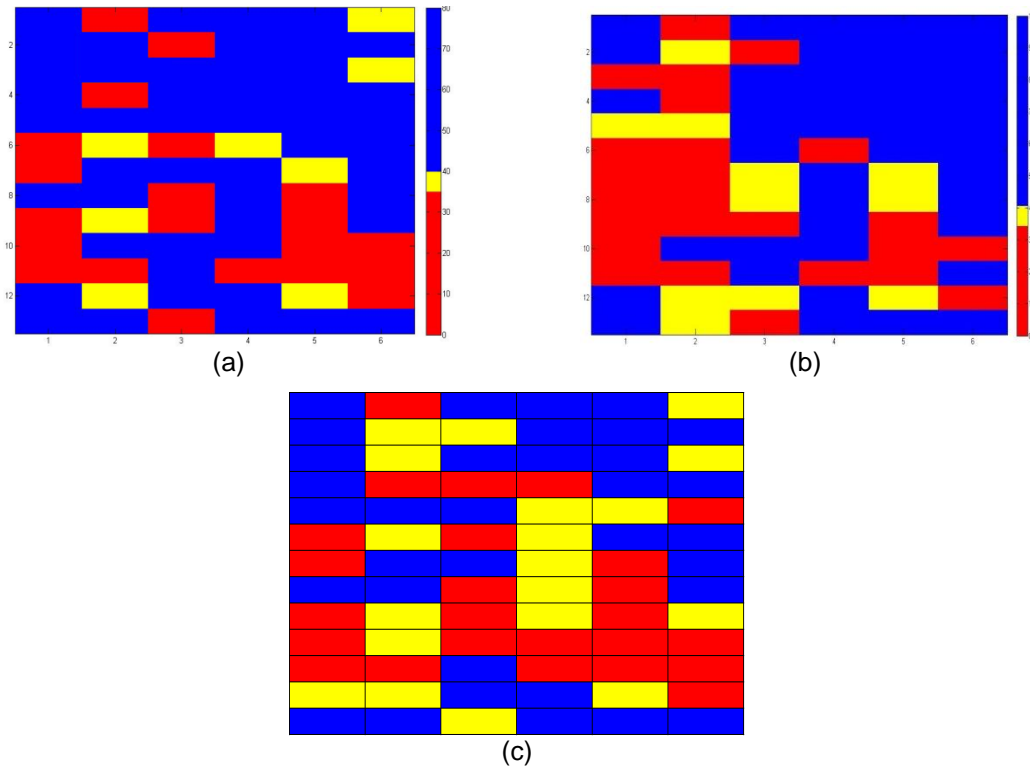


Figura 46 – Mapas C-Scan do corpo de prova Sem Defeitos 2-2: (a) inspeção ultrassônica através da metodologia 4, (b) inspeção ultrassônica através da metodologia 1 e (c) inspeção visual após corte

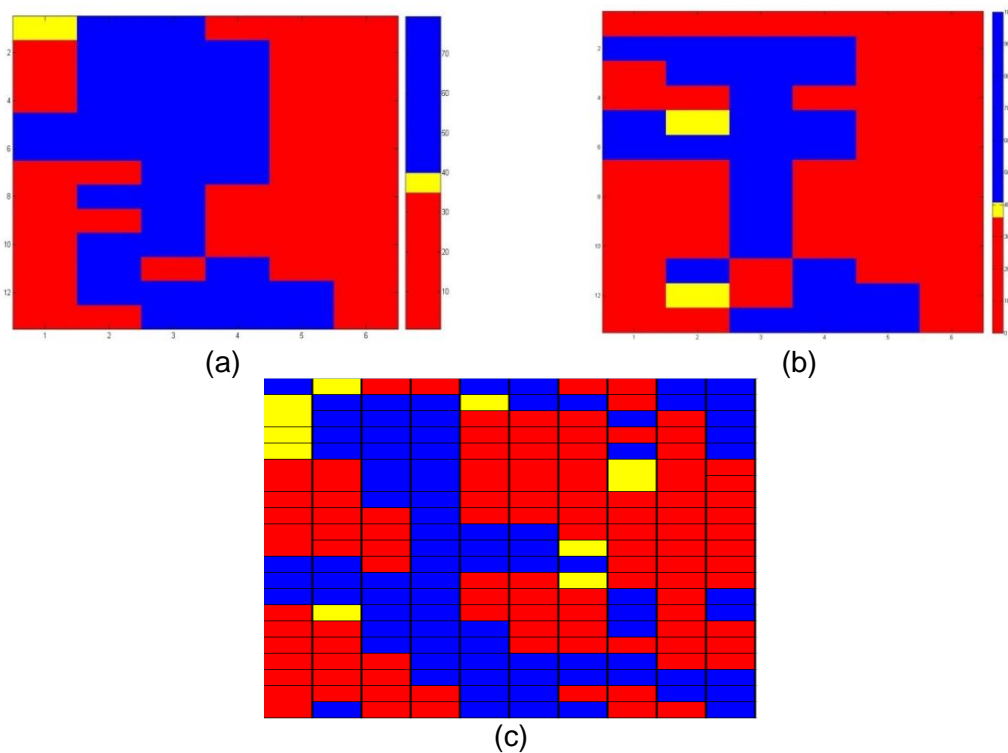


Figura 47 – Mapas C-Scan do corpo de prova Adesivo 8-3: (a) inspeção ultrassônica através da metodologia 4, (b) inspeção ultrassônica através da metodologia 1 e (c) inspeção visual após corte

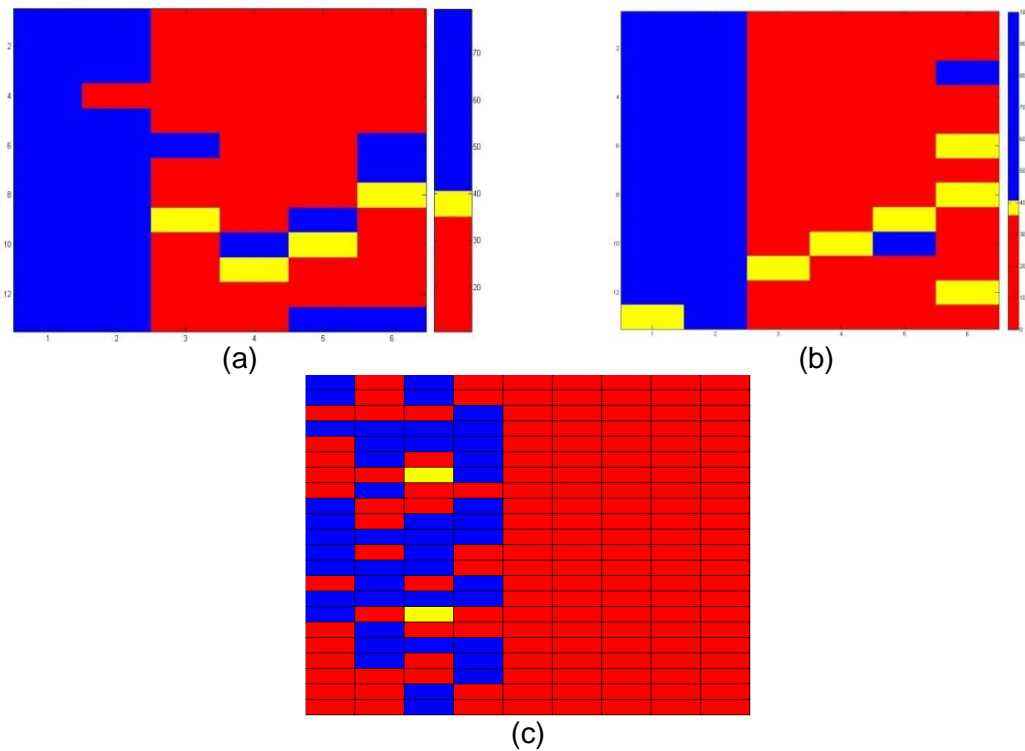


Figura 48 – Mapas C-Scan do corpo de prova Adesão 4-3: (a) inspeção ultrassônica através da metodologia 4, (b) inspeção ultrassônica através da metodologia 1 e (c) inspeção visual após corte

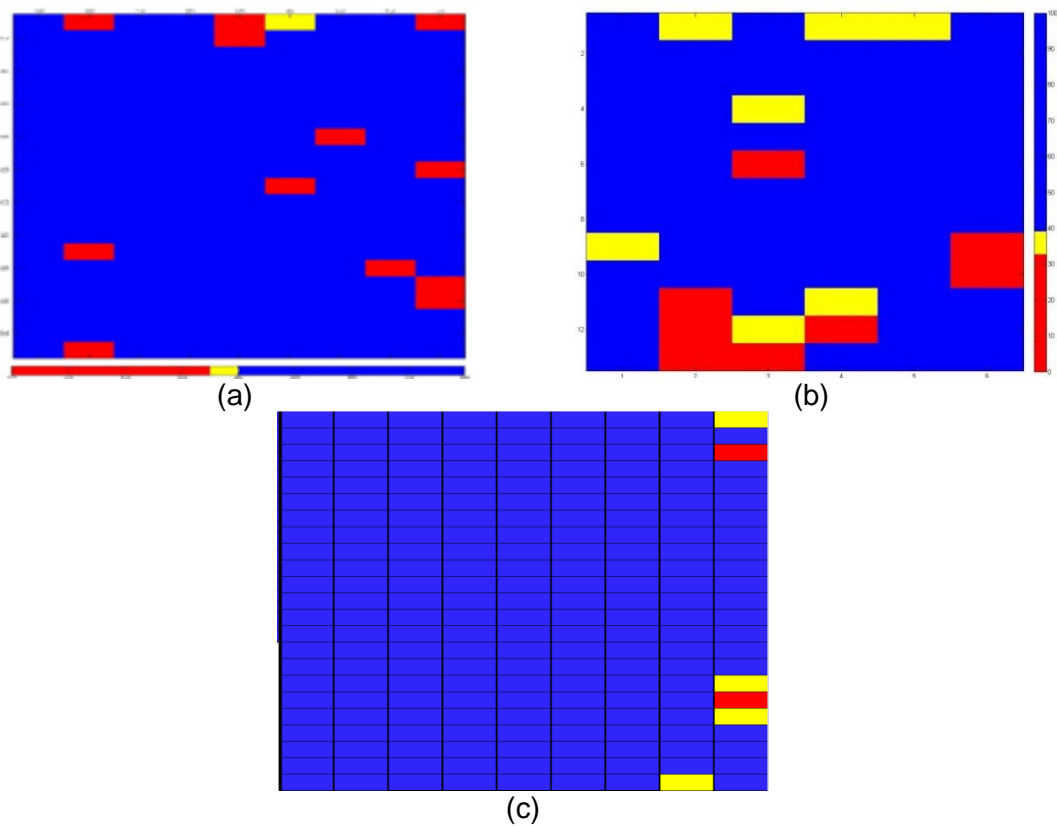


Figura 49 – Mapas C-Scan do corpo de prova Sem Defeitos 2-3: (a) inspeção ultrassônica através da metodologia 4, (b) inspeção ultrassônica através da metodologia 1 e (c) inspeção visual após corte

A comparação e avaliação dos resultados foram realizadas de acordo com a porcentagem de acerto da inspeção ultrassônica em relação à inspeção visual. Um acerto deve ser entendido como o mesmo resultado para um determinado ponto nas duas inspeções. As tabelas 4 e 5 apresentam os dados.

Corpo de Prova	Acerto (%)
Sem Defeito 2-2	55
Sem Defeito 2-3	82
Adesão 4-2	74
Adesão 4-3	78
Adesivo 8-2	60
Adesivo 8-3	58

Corpo de Prova	Acerto (%)
Sem Defeito 2-2	91
Sem Defeito 2-3	91
Adesão 4-2	69
Adesão 4-3	74
Adesivo 8-2	60
Adesivo 8-3	69

A partir das tabelas 4 e 5, é possível observar que as duas metodologias avaliadas possuíram resultados próximos, porém, a metodologia 4 apresentou maior porcentagem de acerto em alguns corpos de prova do que a metodologia 1, se mostrando portanto mais adequada para a inspeção do material em questão.

Foi observado que pequenas áreas defeituosas que se encontram nas extremidades de um dado ponto coberto pelo diâmetro do transdutor, ou seja, que são apenas parcialmente cobertas pelo feixe sônico, nem sempre são apontadas como regiões defeituosas. Como demonstrado no item 4.4.4 do presente trabalho, na profundidade da camada adesiva o feixe sônico cobre uma distância de apenas 9mm, não retornando portanto informações provenientes das extremidades de cada ponto ilustrado na figura 43(a). Assim, quando o feixe se encontra sobre um defeito de área pequena, esse tende a ser refletido pela região adjacente onde não há defeito. A detecção desses defeitos se torna prejudicada graças à dificuldade de uma inspeção contínua e a dependência entre os resultados obtidos e o diâmetro do transdutor, de acordo com a metodologia aplicada. O emprego de transdutores focalizados pode ser uma possível solução para este problema, uma vez que concentram o feixe sônico em um ponto, aumentando a probabilidade de detecção de descontinuidades menores.

Os resultados obtidos nos corpos de prova com o defeito de falta de adesivo apresentaram menor precisão em relação aos demais corpos de prova estudados. Porém, grande parte das discrepâncias apresentadas entre os mapas originados via ultrassom e via inspeção visual se encontram em áreas próximas às bordas dos defeitos. Fatores como efeitos de borda ou mesmo o posicionamento do transdutor, através das metodologias testadas, são os principais responsáveis pela existência destas diferenças. Por conseguinte, é possível afirmar que as metodologias propostas se mostraram eficientes em detectar os defeitos em estudo, porém, um dimensionamento exato de áreas defeituosas se torna prejudicado em decorrência dos fenômenos supracitados.

Os limiares utilizados nas inspeções também foram avaliados após o corte destas juntas. Foi observado que a maior parte das indicações de regiões de transição na inspeção ultrassônica por ambas as metodologias (cor amarela nos mapas) corresponde a regiões defeituosas nas estruturas reais das juntas. Portanto, infere-se que estas regiões, quando detectadas, necessitam de uma análise mais aprofundada. A presença de áreas defeituosas nos arredores das regiões de transição pode indicar que estas também são defeituosas.

É interessante notar que os corpos de prova fornecidos pelo fabricante classificados como não defeituosos na verdade não o são, sendo os defeitos detectados com sucesso através das metodologias empregadas. Isto indica que pode estar havendo algum descuido no momento da confecção destas juntas, resultando em grandes áreas com ausência da camada adesiva, comprometendo a integridade estrutural das tubulações. A figura 50 apresenta o aspecto de algumas áreas do corpo de prova não defeituoso que na verdade apresentou descontinuidades.



Figura 50 – Algumas seções do corpo de prova sem defeito que apresentaram ausência de adesivo

4.4.6. Ensaio de Envelhecimento

4.4.6.1. Variação de Massa

As tabelas 6 e 7 demonstram as variações de massa referentes a todas as amostras, baseadas em medições realizadas antes e após o ensaio de envelhecimento.

Tabela 6 – Comportamento da massa das amostras adesivas

Lote	Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Variação de Massa (g)
1 (72 hs)	5	32,9339	33,1609	0,2270
1 (72 hs)	6	30,6740	30,7899	0,1159
1 (72 hs)	7	35,5660	35,6824	0,1164
2 (120 hs)	3	33,6153	33,8205	0,2052
2 (120 hs)	4	36,1399	36,2966	0,1567
2 (120 hs)	11	29,8906	30,2195	0,3289
3 (240 hs)	1	23,3760	23,6078	0,2318
3 (240 hs)	8	37,0205	37,4486	0,4281
3 (240 hs)	10	38,1113	38,3154	0,2041
4 (720 hs)	2	29,2088	29,7302	0,5214
4 (720 hs)	9	30,7771	31,0704	0,2933
4 (720 hs)	12	28,2859	28,6978	0,4119

Tabela 7 – Comportamento da massa das juntas adesivas

Lote	Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Variação de Massa (g)
1 (24 hs)	6	34,7839	34,8146	0,0307
1 (24 hs)	3	38,8390	38,8713	0,0323
1 (24 hs)	8	37,1642	37,2008	0,0366
2 (72 hs)	1	38,8648	38,9099	0,0451
2 (72 hs)	11	37,6439	37,6922	0,0483
2 (72 hs)	4	36,6249	36,6772	0,0523
3 (120 hs)	12	35,9061	35,9590	0,0529
3 (120 hs)	13	36,7516	36,8116	0,0600
3 (120 hs)	5	38,7407	38,8009	0,0602
4 (240 hs)	9	37,7778	37,8331	0,0553
4 (240 hs)	15	37,7250	37,6063	0,0569
4 (240 hs)	14	37,5462	37,7819	0,0601
5 (720 hs)	2	36,3722	36,4601	0,0879
5 (720 hs)	10	38,4018	38,4969	0,0951
5 (720 hs)	7	38,5373	38,6410	0,1037

O estudo da variação de massa foi baseado na norma ASTM – D5229M – 92. Gráficos de porcentagem de variação de massa *versus* o tempo de ensaio foram plotados para verificar o comportamento das amostras durante o envelhecimento. A porcentagem de variação de massa foi obtida segundo a equação 3:

$$\text{Variação de massa, \%} = \left(\frac{W_f - W_i}{W_i} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

onde W_f é a massa final e W_i é a massa inicial.

Neste caso entende-se como variação de massa a quantidade de água absorvida pelo corpo de prova. Foi verificado que a variação de massa percentual independe da massa do corpo de prova, ou seja, corpos de prova de maiores massas podem tanto absorver mais ou menos água, percentualmente, do que corpos de prova de menores massas.

Para a construção dos gráficos, as amostras, em seus respectivos lotes, foram separadas individualmente em ordem crescente de variação massa. Foram construídos 3 gráficos, o primeiro com as 4 amostras de menor variação de massa de cada lote, o segundo com as 4 amostras de variação de massa intermediária de cada lote e o terceiro com as 4 amostras de maior variação de massa de cada lote. As classificações estão demonstradas nas tabelas 8 e 9. Foi ainda construído um quarto gráfico, considerando a média das variações de massas de cada lote. Os gráficos obtidos estão apresentados a seguir.

Tabela 8 – Divisão das amostras adesivas para construção dos gráficos

Menores			Intermediárias			Maiores		
Lote	Amostra	Variação de Massa (%)	Lote	Amostra	Variação de Massa (%)	Lote	Amostra	Variação de Massa (%)
1	6	0,1159	1	7	0,1164	1	5	0,2270
2	4	0,1567	2	3	0,2052	2	11	0,3289
3	10	0,2041	3	1	0,2318	3	8	0,4281
4	9	0,2933	4	12	0,4119	4	2	0,5214

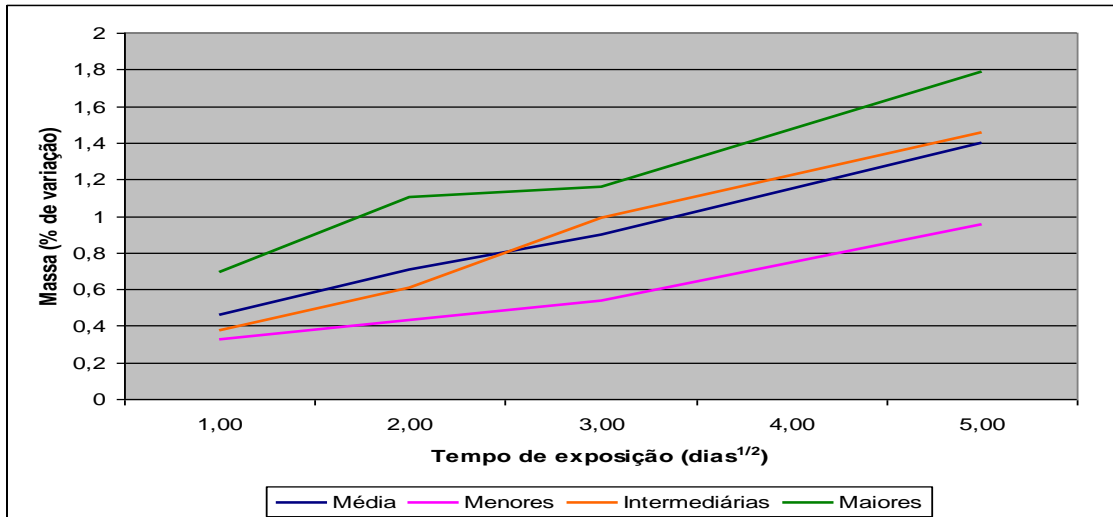


Gráfico 1 – Comportamento das massas dos adesivos com o tempo de ensaio

Tabela 9 – Divisão das amostras das juntas para construção dos gráficos

Menores			Intermediárias			Maiores		
Lote	Amostra	Varição de Massa (%)	Lote	Amostra	Varição de Massa (%)	Lote	Amostra	Varição de Massa (%)
1	6	0,0307	1	3	0,0323	1	8	0,0366
2	1	0,0451	2	11	0,0483	2	4	0,0523
3	12	0,0529	3	13	0,0600	3	5	0,0602
4	9	0,0553	4	15	0,0569	4	14	0,0601
5	2	0,0879	5	10	0,0951	5	7	0,1037

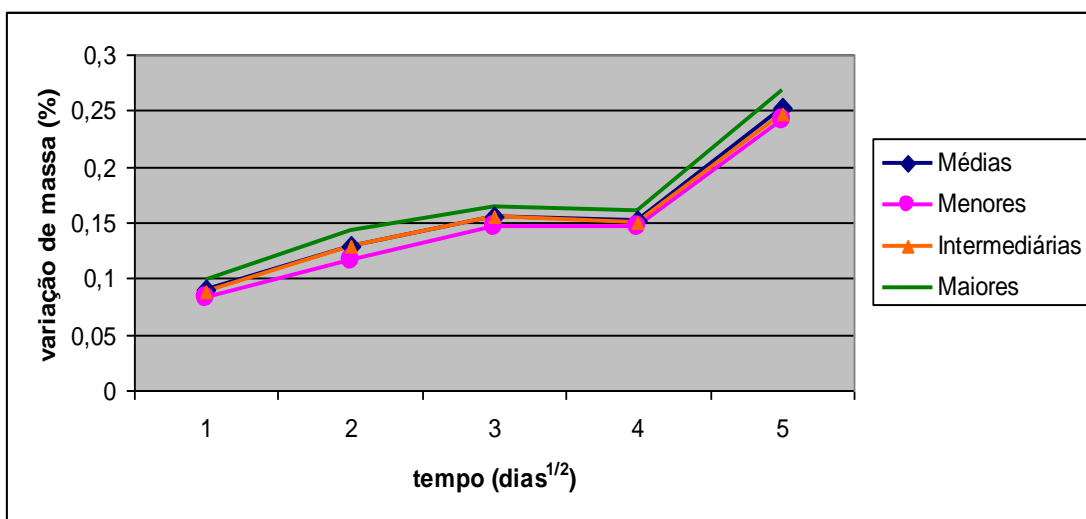


Gráfico 2 – Comportamento das massas das juntas com o tempo de ensaio

Como já foi constatado em trabalhos anteriores, para a temperatura e tempo de ensaio utilizados, é esperado que a curva do ensaio em questão apresente comportamento linear, seguindo a Lei de Fick [34,35]. As curvas obtidas aproximam-se do esperado, apresentando alguns desvios.

É possível observar que a variação de massa das juntas foi mais uniforme que a dos adesivos. A maior uniformidade dos corpos de prova e o fato de a espessura da camada adesiva nestas amostras ser extremamente inferior à espessura das amostras adesivas podem ser a explicação desse fato. Menores quantidades de adesivo possuem menores regiões porosas e, portanto, o comportamento se aproxima da idealidade. A presença de defeitos como vazios ou regiões que não sofreram o processo de cura adequadamente no interior das amostras adesivas pode explicar a ocorrência desses desvios de maior magnitude. Quanto maior é a quantidade de defeitos, maior é a absorção de água, pois o líquido possui mais meios de se difundir pelo interior do material.

4.4.6.2. Comportamento do Sinal Ultrassônico

Durante o ensaio de envelhecimento, as amostras são submetidas a condições críticas de temperatura e pressão. Em consequência, o material ensaiado fica passível de sofrer mudanças estruturais que acarretem em alterações de suas propriedades. Tais alterações podem gerar, por sua vez, modificações no comportamento do ultrassom que atravessa o objeto, uma vez que a inspeção ultrassônica também é um método de caracterização dos materiais.

Tendo em vista eventuais mudanças no sinal ultrassônico das amostras avaliadas, todas tiveram seus A-scans armazenados antes e após o envelhecimento, para futura comparação. As figuras 51 a 54 demonstram os comparativos entre A-scans de algumas amostras.

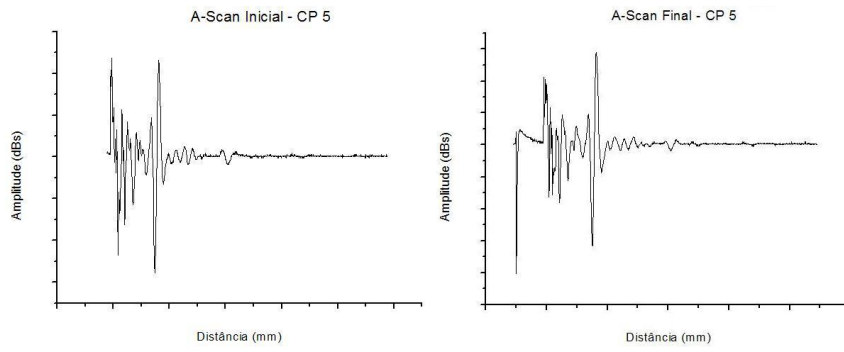


Figura 51 – Comparativo entre A-Scans inicial e final da amostra 5 do adesivo, retirada no primeiro lote

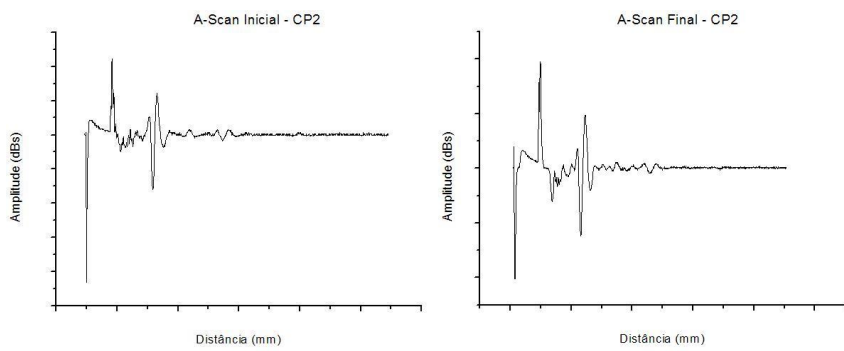


Figura 52– Comparativo entre A-Scans inicial e final da amostra 2 do adesivo, retirada no quarto lote)

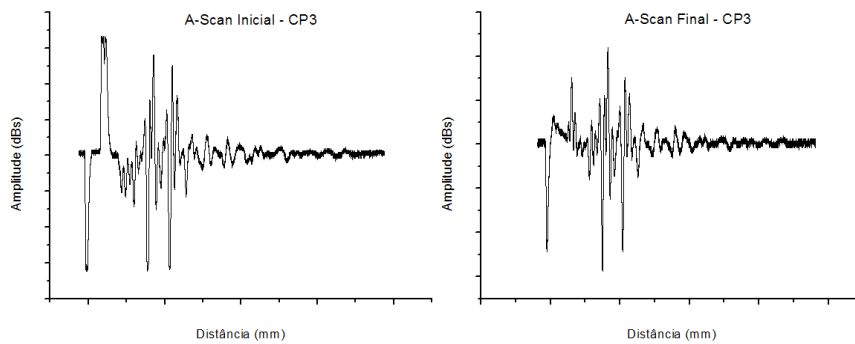


Figura 53 – Comparativo entre A-Scans inicial e final da amostra 3 da junta, retirada no primeiro lote

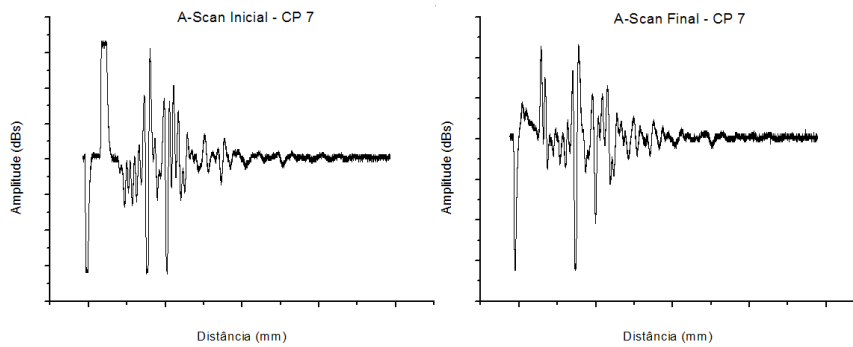


Figura 54– Comparativo entre A-Scans inicial e final da amostra 7 da junta, retirada no quinto lote

A partir das figuras 51 a 54, pode-se constatar que não há nenhuma mudança aparente entre os sinais A-scan das amostras, independentemente do tempo de ensaio a que estas foram submetidas. É possível que o tempo relativamente curto de ensaio, no qual todas as amostras ainda se encontram no regime linear da Lei de Fick, tenha sido insuficiente para acarretar em mudanças tão drásticas nos materiais a ponto de modificar o formato do sinal ultrassônico que os atravessa.

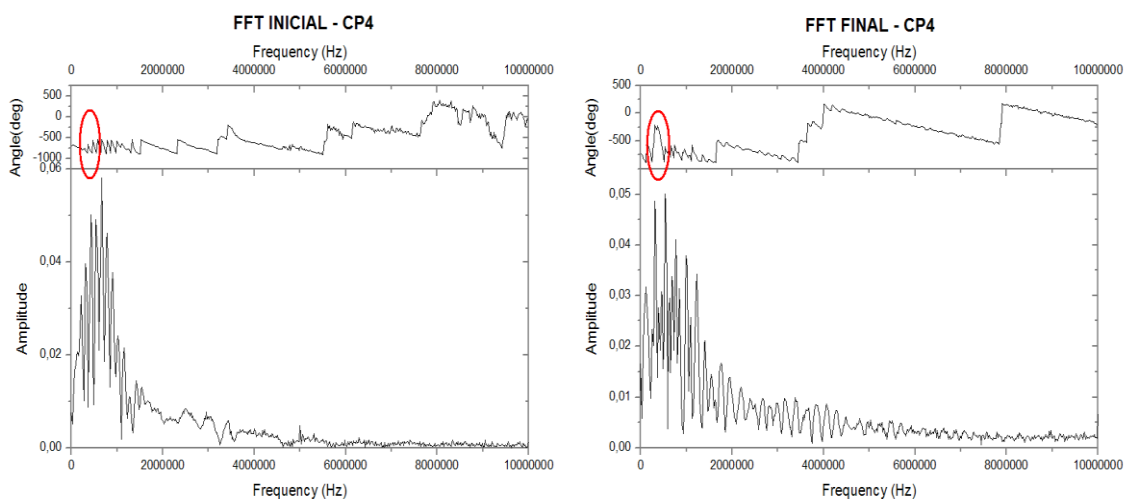
Adicionalmente, objetivando a obtenção de resultados mais aprofundados, foi realizado um tratamento destes sinais registrados através da Transformada Rápida de Fourier (FFT), com o auxílio do software Origin. Através da FFT, o sinal ultrassônico deixa de ser apresentado no domínio do tempo, como em um gráfico A-scan, e passa a ser representado no domínio da frequência. Esta mudança de domínios resulta em um ganho de informações, como ângulo de fase e amplitude de frequência, cujos comportamentos podem indicar mudanças estruturais nos materiais [37].

Para este trabalho, foram analisados dois gráficos obtidos via FFT: o primeiro apresenta a amplitude do sinal *versus* a frequência; o segundo, o ângulo de fase *versus* a frequência.

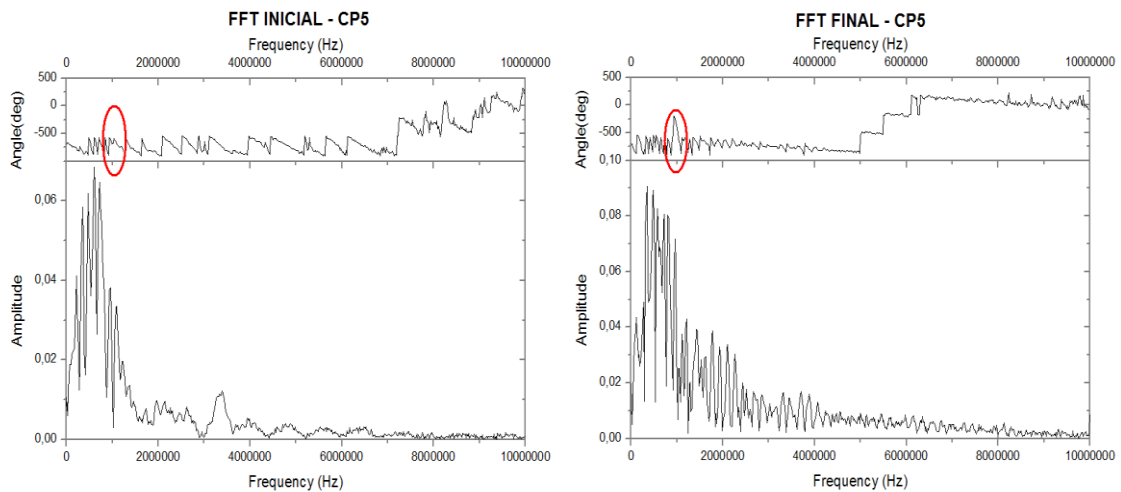
Considerando-se inicialmente o caso das amostras puramente adesivas, os respectivos gráficos gerados via FFT demonstraram uma mudança de comportamento similar entre o sinal inicial e final de 8 das 9 amostras referentes aos três primeiros lotes. Os gráficos finais das amostras 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 e 11 apresentam picos inexistentes nos gráficos iniciais entre a faixa de frequências de 0,3MHz a 1MHz. Esta mudança de comportamento está exemplificada e realçada na cor vermelha na figura 55. As amostras do quarto lote também apresentaram mudanças de comportamento entre os gráficos de FFT iniciais e finais, porém, não seguiram nenhum padrão.

Os gráficos gerados via FFT para as amostras da junta também apresentaram diferenças entre o comportamento inicial e final dos sinais, porém não se observa nenhum padrão de comportamento. Alguns gráficos obtidos estão apresentados a seguir na figura 56, onde as mudanças verificadas estão realçadas em vermelho.

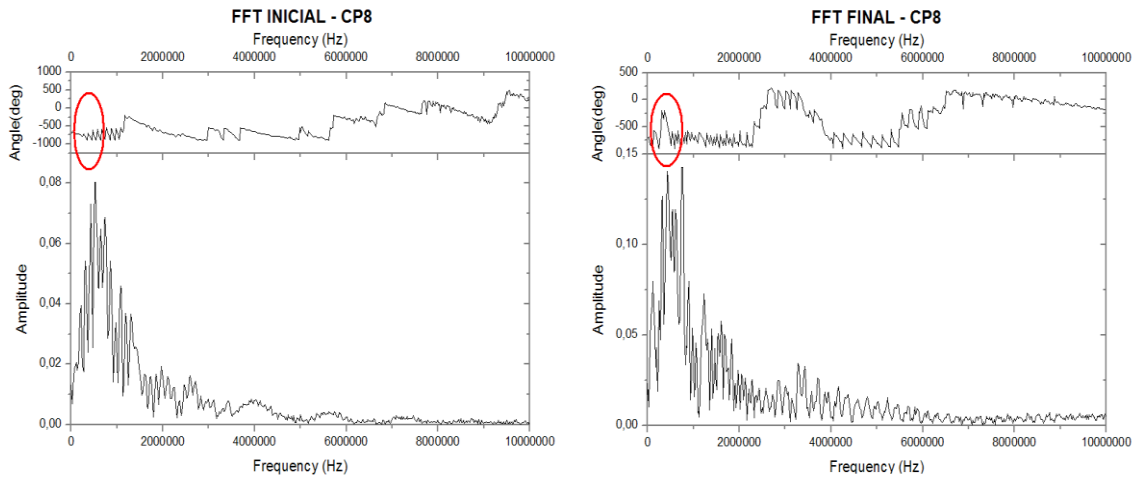
A existência de discrepâncias entre os gráficos inicial e final indicam que houve alguma alteração na resposta do material ao refletir o feixe sônico, sugerindo que modificações ocorreram na estrutura do corpo de prova durante o ensaio de envelhecimento.



(a)

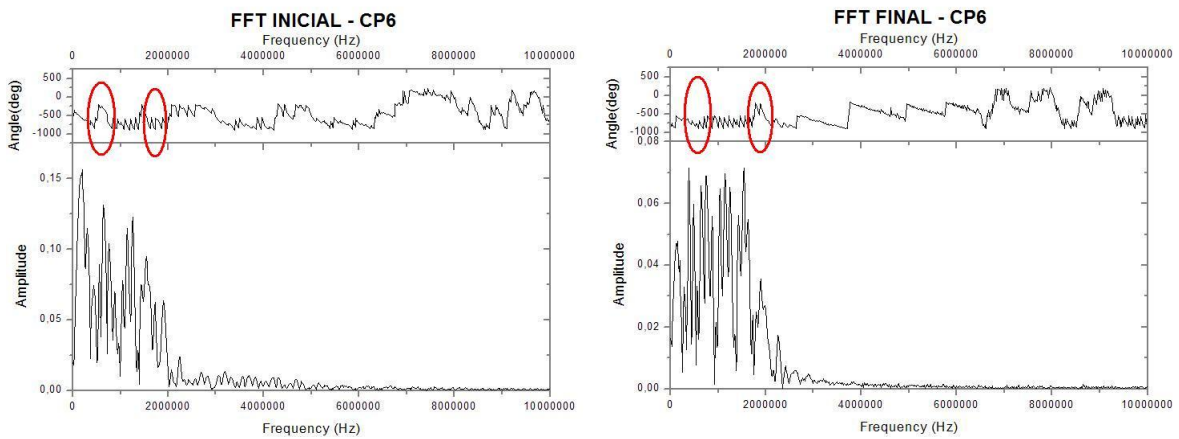


(b)

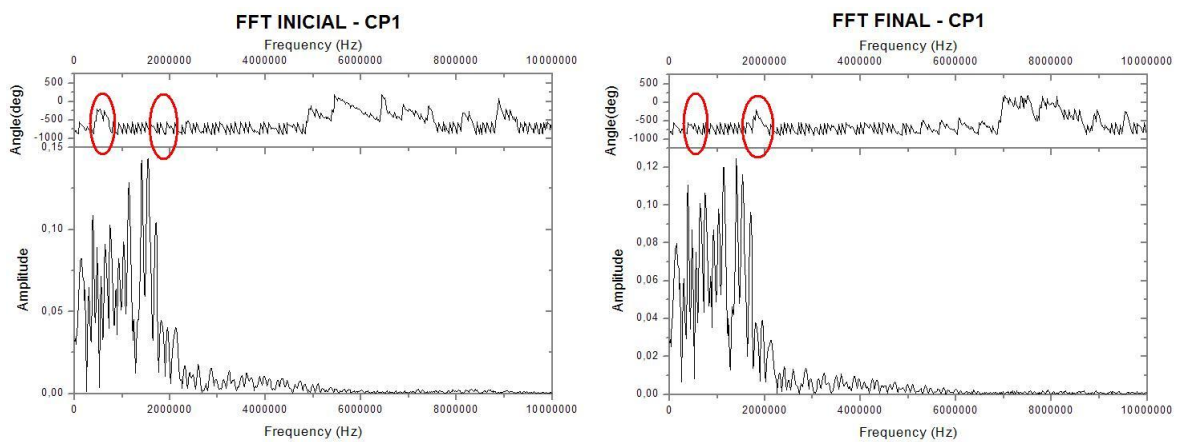


(c)

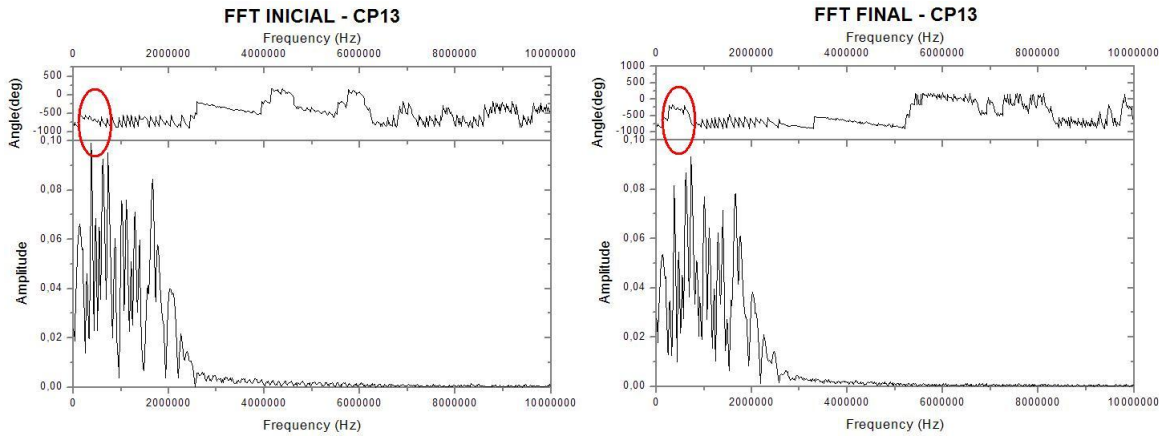
Figura 55 – FFTs das amostras adesivas (a) 4 (primeiro lote), (b) 5 (segundo lote) e (c) 8 (terceiro lote)



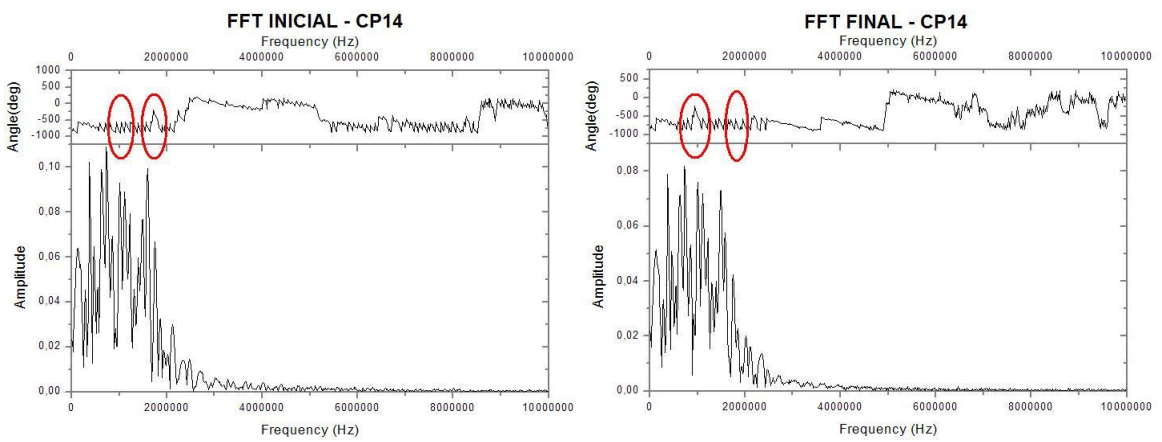
(a)



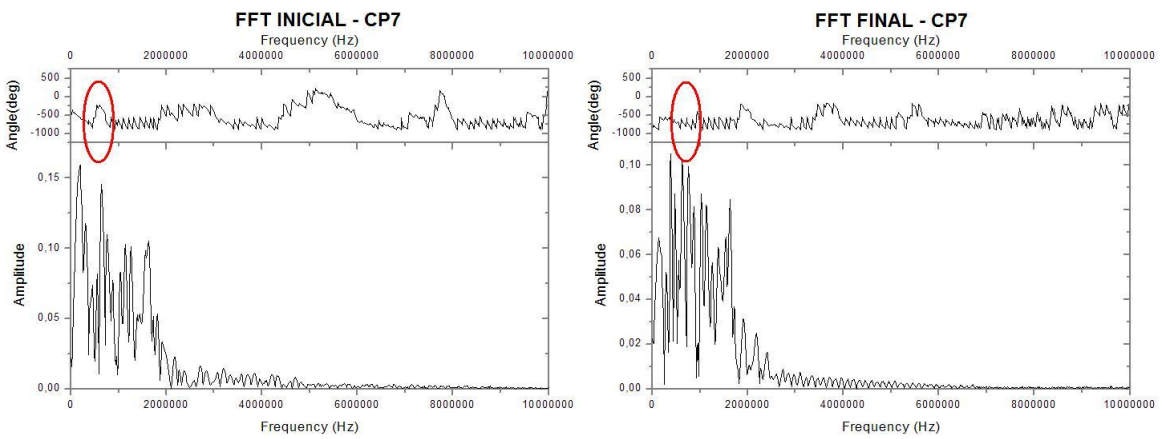
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 56 – FFTs iniciais e finais das amostras da junta (a) 6 – primeiro lote, (b) 1 – segundo lote, (c) 13 – terceiro lote, (d) 14 – quarto lote e (e) 7 – quinto lote

4.4.6.3. Comportamento da Velocidade Ultrassônica

A tabela 10 demonstra as variações de velocidade referentes às amostras puramente adesivas, baseadas em medições realizadas antes e após o ensaio de envelhecimento. Não foi possível realizar medições de velocidades nas amostras da junta em consequência de suas características atenuantes, que impediam a formação de uma segunda reflexão clara de um mesmo ponto na tela do aparelho.

Tabela 10 – Comportamento da velocidade ultrassônica das amostras adesivas

Lote	Amostra	Velocidade Inicial (m/s)	Velocidade Final (m/s)	Variação de Velocidade (m/s)
1 (72 hs)	5	1152,07	1147,49	-4,58
1 (72 hs)	6	1198,63	1202,75	4,12
1 (72 hs)	7	1195,81	1197,25	1,44
2 (120 hs)	3	1183,39	1191,79	8,40
2 (120 hs)	4	1197,60	1201,20	3,60
2 (120 hs)	11	1168,00	1237,29	69,29
3 (240 hs)	1	1279,90	1202,25	-77,65
3 (240 hs)	8	1250,00	1239,13	-10,87
3 (240 hs)	10	1170,21	1170,21	0
4 (720 hs)	2	1164,62	1172,84	8,22
4 (720 hs)	9	1186,74	1220,83	34,09
4 (720 hs)	12	1151,69	1152,77	1,08

Como é possível observar na tabela 6, a velocidade ultrassônica das amostras sofreu mudanças no decorrer dos ensaios, indicando que possa haver alguma alteração estrutural nas amostras. Porém, não foi possível estabelecer um padrão de ocorrência entre os resultados obtidos, impossibilitando uma conclusão com maior grau de aprofundamento em relação ao exato significado desta mudança de comportamento.

5. Conclusões

A inspeção ultrassônica, através das metodologias propostas, se mostrou adequada para a detecção das classes de defeitos “Falta de Adesão” e “Falta de Adesivo”, na forma em que foram simuladas. A metodologia 4, descrita na seção 3.4.2.4 do presente trabalho, foi a que apresentou os resultados que melhor representaram a estrutura real dos corpos de prova estudados.

Dentre os transdutores testados, os que possuem frequência ao redor de 1MHz foram os que produziram os melhores resultados, sendo então os mais indicados para a inspeção do material em questão.

Os blocos de referência desenvolvidos também se mostraram adequados para a calibração e validação do ensaio ultrassônico.

O corte em serra de fita dos corpos de prova inspecionados permitiu a comprovação física dos resultados obtidos. Adicionalmente, após o corte, foi observado que os corpos de prova caracterizados como não-defeituosos pelo fabricante na verdade possuem áreas com ausência de adesivo, indicando a possível existência de alguma inadequação no processo de montagem destas juntas.

Algumas áreas com ausência de adesivo não foram detectadas pela inspeção ultrassônica. Grande parte destes defeitos se restringe às bordas das seções observadas e a não-deteção destes pode ser consequência da impossibilidade de uma inspeção contínua dos corpos-de-prova em questão. A dimensão dos transdutores de baixa frequência dificulta a detecção de defeitos pequenos ou que são apenas parcialmente detectados pelo transdutor, pois a conicidade do feixe sônico faz com que o sinal consiga passar pelas regiões adjacentes ao defeito e gera o sinal da superfície interna, característica de regiões não-defeituosas.

O critério de aceitação utilizado nos ensaios resultou em índices de acerto, em relação aos cortes e verificação físicas das descontinuidades, que podem ser considerados satisfatórios - acima de 60% para as classes de defeitos pesquisadas. É necessária, porém, uma análise estrutural da junta com relação à resistência mecânica e aderência da camada adesiva relacionando seus resultados com a quantidade mínima de vazios para a garantia da integridade da junta, visto que até as juntas consideradas perfeitas pelo fabricante contém descontinuidades. Assim, poder-se-á, a partir de mapeamentos feitos pela técnica ultrassônica, criar um critério de aceitação para o uso das juntas em campo.

O lixamento da superfície aumenta a facilidade para o acoplamento do transdutor à superfície do material, tornando a inspeção mais rápida e confiável. Porém, não é possível afirmar que a integridade da junta continua garantida após o lixamento superficial, sendo necessária a realização de ensaios mecânicos para tal verificação.

Pelos resultados obtidos pelos ensaios de envelhecimento e pelas características destes tipos de adesivos pode-se afirmar que há absorção de água predominantemente na camada adesiva, o que pode representar risco a integridade da junta, uma vez que este fenômeno pode alterar propriedades químicas e físicas do adesivo com o decorrer do tempo. Ensaios mecânicos podem mensurar o grau de risco que a absorção de água nas juntas pode representar em condições de operação dos dutos, todavia este estudo não faz parte do escopo do presente trabalho.

O método ultrassônico não se mostrou indicado para a avaliação de alguma possível mudança estrutural ocorrida ao decorrer dos ensaios de envelhecimento nas amostras avaliadas. Foram observadas ocorrências esporádicas de anomalias no sinal ultrassônico, no domínio da frequência, indicadas pelas mudanças de ângulos de fase. Esta alteração na resposta do material ao refletir o feixe sônico indica que podem estar havendo modificações na estrutura da junta ou do adesivo, porém, a falta de um padrão de comportamento impede uma interpretação e avaliação mais precisa dos resultados obtidos. De modo geral, não foi possível determinar o envelhecimento da junta adesiva através da técnica ultrassônica. Mais uma vez, outros ensaios de natureza química e mecânica podem ser feitos para comprovar as possíveis alterações estruturais.

6.Trabalhos Futuros

Tendo em vista um aprimoramento da metodologia desenvolvida neste projeto, alguns procedimentos poderão ser realizados em trabalhos futuros:

- Emprego de transdutores focalizados, permitindo a detecção de defeitos não detectáveis através da metodologia proposta, como disposto na seção 4.4.5 do presente trabalho.
- Re-inspecionar os corpos de prova através da metodologia considerada mais adequada, porém, não mais utilizando o diâmetro do transdutor como fator limitante, e sim a distância coberta pelo feixe sônico na profundidade relativa à camada adesiva da junta, avaliando eventuais discrepâncias entre os resultados obtidos entre as inspeções realizadas.
- Automatização da inspeção, tornando-a mais rápida e possibilitando a sua aplicação em campo.

7. Referências Bibliográficas

1. CHUNG, D. D. L. **Composite Materials: Science and Applications**. 2nd ed. New York: Springer, 2010.
2. ISHAI, O. , Daniel, I. M. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1994.
3. Disponível em: <http://www.demar.eel.usp.br/compositos/Notas_aula/introducao.pdf>. Acesso em: 1 out. 2011.
4. PINTO, K. N. C. **Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: poliéster insaturadoreforçado com fibras de vidro**. Instituto de pesquisas energéticas e nucleares. M.Sc. São Paulo, 2002.
5. OTA, W. N. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional**. M.Sc. Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2004.
6. FARO, A. A. D. S. **Desenvolvimento de tubos compósitos produzidos por enrolamento filamentar para possíveis aplicações como risers rígidos**. M.Sc. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
7. GIBSON, R. F. **Principles of Composites Material Mechanics**. 1st ed. New York: McGraw-Hill, 1994.
8. BOERI, D. V. **Caracterização de Materiais Compostos por Ultrassom**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.
9. HUANG, W., ROKHLIN, S. I. , WANG, Y. J. **Effect of fibre-matrix interphase on wave propagation along, and scattering from, multilayered fibres in composites. Transfer matrix approach**. Ultrasonics, Columbus, v. 33, n. 5, p. 365-375, 1995.
10. FONSECA, S. C. D. **Materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras usados na engenharia civil: Características e aplicações**. 1ª. ed., 2006.
11. SANTIM, J. L. **Ultra-som: Técnica e Aplicação**. PETROBRAS.
12. **Non Destructive Testing Handbook**. 3rd ed. Columbus: American Society of Non Destructive Testing, v. 7, 2007.
13. NDT Resource Center. Disponível em: <<http://www.ndt-ed.org>>. Acesso em: 15 out. 2011.

14. ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultrassom**. ABENDE, 2003.
15. KRAUTKRÄMER, J., KRAUTKRÄMER, H. **Ultrasonic Testing of Materials**. 3rd ed. Springer-Verlag, 1983.
16. SCHMERR, L. W. **Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation: a modeling approach**. New York: Springer, 1998.
17. American Society of Non Destructive Testing
17. HIRSEKORN, S. **Nonlinear transfer of ultrasound by adhesive joints – a theoretical description**. *Ultrasonics*, v. 39, p. 57-68, 2001.
18. WEGNER, A., KOKA, A., JANSER, U. et al. **Assesment of the adhesion quality of fusion-welded silicon wafers with nonlinear ultrasound**. *Ultrasonics*, v. 38, p. 316-321, 2000.
19. NESVIJSKI, E. G. **Some aspects of ultrasonic testing of composites**. *Composite Structures*, v. 48, p. 151-155, 2000.
20. BROTHERHOOD C.J., DRINKWATER, B. W., DIXON, S. **The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques**. *Ultrasonics*, v. 41, p. 521-529 , 2003.
21. TETI, R. **Ultrasonic Identification and Measurement of Defects in Composite Material Laminates**. *Annals of the CIRP*, v. 39, p. 527-530, 1990.
22. GROS, X. E. **Current and future trends in non-destructive testing of composite materials**. *Ann. Chim. Sci. Mat*, v. 25, p. 539-544, 2000.
23. MAEVA, E. Y., SEVERINA, I., CHAPMAN II, G. B. **Ultrasonic Analysis of the Degree of Cure and Cohesive Properties of the Adhesive in a Bond Joint**. *Research in Nondestructive Evaluation*, v. 18, p. 121-138, 2007.
24. SCARPONI C., BRIOTTI, G. **Ultrasonic technique for the evaluation of delaminations on CFRP, GFRP, KFRP composite materials**. *Composites*, v. 31, p. 237–243, 2000.
25. D’ORAZIO, T., LEO, M., DISTANTE, A., et al. **Automatic ultrasonic inspection for internal defect detection in composite materials**. *NDT&E International*, v. 41, p. 145–154, 2008.
26. ROBINSON, A.M., DRINKWATER, B. W., ALLIN, J. **Dry-coupled low-frequency ultrasonic wheel probes: application to adhesive bond inspection**. *NDT&E International*, v. 36, p. 27-36, 2003.
27. MAEVA, E., SEVERINA, I., BONDARENKO, S., et al. **Acoustical methods for the investigation of adhesively bonded structures: a review**. *Can. J. Phys*, v. 82, p. 981–1025, 2004.

28. MOURITZ, A.P., TOWNSEND, C., SHAH KHAN, M.Z. **Non-destructive detection of fatigue damage in thick composites by pulse-echo ultrasonics**. Composites Science and Technology, v. 60, p. 23-32, 2000.
29. TSUSHIMA S., O. M. **Nondestructive evaluation of fatigue damages in FRP using ultrasonic waves**. Proc. US-Pacific Rim Workshop on Composite Materials for Ships and Offshore Structures, Honolulu, 1998.
30. BASTIANINI, F., DI TOMMASO, A., PASCALE, G. **Ultrasonic non-destructive assessment of bonding defects in composite structural strengthenings**. Composite Structures, v. 53, p. 463-467, 2001.
31. IZQUIERDO, M.A.G., HERNÁNDEZ, M. G., GRAULLERA, O. et al. **Signal-to-noise ratio enhancement based on the whitening transformation of colored structural noise**. Ultrasonics, v. 38, p. 500-502, 2000.
32. PARDO, E., SAN EMETERIO, J.L., RODRIGUEZ, M.A., et al. **Noise reduction in ultrasonic NDT using undecimated wavelet transforms**. Ultrasonics, v. 44, p. 1063-1067, 2006.
33. ADAMS, R.D., SINGH, M.M. **The effect of immersion in sea water on the dynamic properties of fibre-reinforced flexibilised epoxy composites**. Composite Structures, v. 31, p. 119, 1995.
34. XIAO, G. Z., SHANAHAN, M. E. R. **Swelling of DGEBA/DDA epoxy resin during hygrothermal ageing**. Polymer, v. 39, p. 32-53, 1998.
35. SALES, R. C. M., BRUNELLI, D.D. **Hygrothermal effect in glass fiber/epoxy by luminescence spectroscopy**, v. 18, 2008.
36. LI, C., DICKIE, R. A., MORMAN, K. N. **Dynamic mechanical response of adhesively bonded beams: Effect of environmental exposure and interfacial zone properties**. Polymers Engeneering Science, v. 30, 1990.
37. SANTOS, A. X. D. **Estudo de uma nova técnica de medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica usando o espectro de frequência**. Instituto de Engenharia Nuclear. Rio de Janeiro. 2010.