



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

**Instituto Politécnico**

**Vitor Joachim Cortines**

**Estudo da inspeção e caracterização de materiais compósitos por  
ultrassom**

**Nova Friburgo**

**2014**

Vitor Joachim Cortines

**Estudo da inspeção e caracterização de materiais compósitos por ultrassom**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio

**Nova Friburgo**

**2014**

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/E

C829 Cortines, Vitor Joachim.  
Estudo da inspeção e caracterização de materiais compósitos por ultrassom / Vitor Joachim Cortines.- 2014.  
67 f. : il.

Orientador: Eduardo Martins Sampaio.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Testes não-destrutivos – Teses. 2. Materiais compostos – Teses. 3. Concreto - Teses. I. Sampaio, Eduardo Martins. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 620.172/.179:624.012.4

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

---

Assinatura

---

Data

Vitor Joachim Cortines

**Estudo da inspeção e caracterização de materiais compósitos por ultrassom**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovado em

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio (Orientador)  
Instituto Politécnico - UERJ

---

Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis  
Instituto Politécnico - UERJ

---

Dr. Fábio Ladeira Barcia  
Diretor Técnico POLINOVA

Nova Friburgo

2014

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Ingrid e Anacir,  
A minha irmã, Erika  
A minha esposa Janaína  
pelo amor, confiança, respeito, carinho e incentivo.

## AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Ingrid, e ao meu pai Anacir, pelo apoio, amor e compreensão durante a trajetória até aqui.

Ao meu orientador Eduardo Martins Sampaio pelos exemplos de confiança, coragem, dedicação, perseverança e companheirismo ao me permitir e incentivar a desbravar o campo dos ensaios não destrutivos.

A minha irmã, Erika, por mostrar o caminho e servir de exemplo.

A minha esposa, Janaína, pelo apoio, paciência, amor e dedicação, e por ser mais do que poderia descrever aqui.

A toda equipe do Laboratório de Adesão e Aderência, Anselmo, Jane, Marcelo, Nelson (*in memoriam*), Guilherme, Edvan, Rodrigo, Wilson, Ricardo, pelo companheirismo e auxílio no desenvolvimento de minhas tarefas.

Ao engenheiro, amigo e conselheiro Ney Robson por sempre estar pronto a ajudar e a mostrar uma perspectiva diferente.

Ao Professor Joaquim Teixeira de Assis, pelo incentivo e por disponibilizar seus recursos para o desenvolvimento deste trabalho.

À coordenação de PGCTM por todo o apoio.

A todos meus amigos e familiares, que direta e indiretamente, participaram dessa trajetória. Essa conquista é nossa!

Aos funcionários da secretaria da unidade do IPRJ, pela solicitude nos serviços prestados.

A Jon Lord, Ian Paice, Neil Peart, Geddy Lee, Alex Lifeson, Mike Portnoy, John Bohnam, Chris Squire, Steve Howe, Vincent Paul Abbot, David Gilmour, Roger Waters, Bill Ward, Tony Yommi e tantos outros, pelo incentivo adicional.

Viva como se fosse morrer amanhã.  
Aprenda como se fosse viver para sempre.

*Mahatma Ghandi*

## RESUMO

CORTINES, Vitor Joachim. *Estudo da inspeção e caracterização de materiais compósitos por ultrassom*. 2014. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2014.

O presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de estudar a utilização do método de ensaio não destrutivo de ultrassom para inspecionar e caracterizar materiais compósitos. Os objetivos principais da pesquisa foram medir a espessura, encontrar e dimensionar delaminações em reparo de material compósito laminado para tubulações e medir a velocidade do som no concreto para o cálculo do módulo de elasticidade. Inicialmente foram estudados os parâmetros físicos relevantes inerentes a cada material para o método de ultrassom, para então estabelecer uma metodologia de inspeção. A técnica de pulso-eco foi capaz de encontrar as descontinuidades no compósito laminado. Para a determinação do módulo de elasticidade do concreto, a técnica de transmissão foi utilizada obtendo-se resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Compósitos. Laminado. Ultrassom. END. Inspeção. Concreto.



## ABSTRACT

CORTINES, Vitor Joachim. *Study of inspection and characterization of composite materials by ultrasound*. 2014. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2014.

This work was developed with the intention of using the non-destructive testing method of ultrasound to inspect and characterize composite materials. The main objectives of the research were to find and size delaminations in laminated composite material for pipeline repair and to measure sound speed in concrete in order to determine its elastic modulus. Initially, the relevant physical parameters inherent to each material were studied regarding ultrasound so to establish a testing methodology. The pulse-eco technique was used to find discontinuities in laminated composite. To determine the elastic modulus of concrete, the through transmission technique was used with satisfactory results.

Keywords: Composites.Laminates.Ultrasound.NDT.Inspection.Concrete.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados das medições de velocidade do som no compósito laminado.....	51
Tabela 2 - Espessuras e tempos medidos e velocidades calculadas para os corpos de prova.....	55
Tabela 3 - Módulo de elasticidade dos corpos de prova e os valores utilizados para seu cálculo.....	56
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do compósito ensaiado.....	56
Tabela 5 - Traço da série S20 .....	58
Tabela 6 - Traço da série S30 .....	59
Tabela 7 - Valores obtidos nas medições com ultrassom para a série S20 .....	59
Tabela 8 - Valores obtidos na medições com ultrassom para a série S30 .....	59
Tabela 9 - Valores obtidos no ensaio mecânico das amostras.....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Inspeção por ensaio visual .....	18
Figura 2 - Equipamento eletrônico para ensaio acústico .....	19
Figura 3 - Medição de espessura por ultrassom .....	20
Figura 4 - Imagem termográfica de tubulação.....	21
Figura 5 - simplificação do funcionamento do método de shearografia .....	22
Figura 6 - Inspeção por shearografia .....	23
Figura 7 - Imagem radiográfica de uma estrutura <i>honeycomb</i> .....	24
Figura 8 - Representação C-Scan de inspeção por ultrassom.....	25
Figura 9 - Representação das faixas de frequência do infra ao ultrassom.....	26
Figura 10 - Representação de uma onda longitudinal .....	27
Figura 11 - Representação de onda transversal .....	28
Figura 12 - Circuito básico de funcionamento de um aparelho de ultrassom .....	31
Figura 13 - Representação do A-scan.....	32
Figura 14 - Representação do B-scan .....	33
Figura 15 - Inspeção e representação do C-scan .....	33
Figura 16 - Inspeção e Representação do P-scan .....	34
Figura 17 - Ilustração da técnica de pulso-eco .....	35
Figura 18 - Picos de reflexões do sinal de ultrassom para espessura de 6,25mm .....	35
Figura 19 - Ilustração da técnica por contato direto .....	36
Figura 20 - Representação da tela (A-scan) da inspeção ilustrada na figura 12.....	37
Figura 21 - Ilustração da técnica de imersão .....	38
Figura 22 - Ecos da coluna de líquido e da peça .....	39
Figura 23 – Tipos de descontinuidades encontradas em materiais compósitos .....	41
Figura 24 - Configurações de fibras para compósitos de matriz polimérica.....	42
Figura 25 - Etapas do processo de laminação.....	43
Figura 26 - Laminação concluída .....	43
Figura 27 - Configurações de medição de velocidade do som em concreto .....	45
Figura 28 - Vistas da usinagem de perda de espessura dos corpos de prova utilizados .	47
Figura 29 - Aparelho de ultrassom e transdutor utilizados.....	50
Figura 30 - Corpo de prova de PVC laminado com material compósito .....	52

Figura 31 - Sinal no modo de Rádio Frequência (RF) obtido no ponto com delaminação .....	52
Figura 32 - Sinal RF obtido no ponto sem delaminação .....	53
Figura 33 - Sinal de onda retificada do trecho sem perda de espessura .....	53
Figura 34 - Sinal com onda retificada do trecho limítrofe da perda de espessura.....	54
Figura 35 - Aparelho de ultrassom, transdutores e configuração de ensaio utilizados ..	57
Figura 36 - Curva de correlação velocidade x resistência em função da quantidade de agregado graúdo.....	58
Figura 37 - Comparação dos sinais na área sem delaminação e com delaminação.....	61
Figura 38 - Valores da resistência à compressão do concreto obtidos com o ultrassom para os corpos de prova da série S20.....	64
Figura 39 - Valores da resistência à compressão do concreto obtidos com o ultrassom para os corpos de prova da série S30.....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E$	Módulo de elasticidade
$f$	Frequência
$G$	Módulo de cisalhamento
$\lambda$	Comprimento de onda
$\mu$	Coefficiente de Poisson
$R$	Reflexão da onda sonora
$\rho$	Densidade linear
$T$	Transmissão da onda sonora
$V$	Velocidade do som no meio
$V_L$	Velocidade longitudinal do som no meio
$V_T$	Velocidade transversal do som no meio
$Z$	Impedância acústica do meio
$Z_1$	Impedância acústica do meio 1
$Z_2$	Impedância acústica do meio 2

## LISTA DE ABREVIATURAS

A-scan	Representação da amplitude do pulso de ultrassom
B-scan	Representação em “corte lateral” da espessura do material
C-scan	Representação em “vista superior” do material
C.A.	Agregado Graúdo
CENPES	Centro de Pesquisa da Petrobras
CMP	Compósitos de Matriz Polimérica
END	Ensaio Não Destrutivo
ISO	International Organization for Standardization
LAA	Laboratório de Adesão e Aderência
LEF	Laboratório de Ensaio Físico
P-scan	Representação da varredura <i>phased array</i> do material

## SUMÁRIO

	<b><u>INTRODUÇÃO</u></b> .....	<b>15</b>
<b><u>1</u></b>	<b><u>TÉCNICAS DE INSPEÇÃO EM COMPÓSITOS</u></b> .....	<b>18</b>
1.1	<b><u>Ensaio visual</u></b> .....	18
1.1.1	<b><u>Ensaio acústico</u></b> .....	19
1.1.2	<b><u>Ultrassom</u></b> .....	20
1.1.3	<b><u>Termografia de Infravermelho</u></b> .....	21
1.1.4	<b><u>Shearografia</u></b> .....	22
1.1.5	<b><u>Radiografia</u></b> .....	23
<b><u>2</u></b>	<b><u>TEORIA DO ULTRASSOM</u></b> .....	<b>26</b>
<b><u>2.1</u></b>	<b><u>Ondas ultrassônicas</u></b> .....	26
<b><u>2.2</u></b>	<b><u>Comprimento de onda e frequência</u></b> .....	29
<b><u>2.3</u></b>	<b><u>Acoplantes</u></b> .....	30
<b><u>2.4</u></b>	<b><u>O aparelho de ultrassom</u></b> .....	31
<b><u>2.5</u></b>	<b><u>Inspeção por ultrassom</u></b> .....	32
<b><u>2.6</u></b>	<b><u>O método pulso-eco</u></b> .....	34
<b><u>2.7</u></b>	<b><u>Técnica por contato direto</u></b> .....	36
<b><u>2.8</u></b>	<b><u>Técnica de imersão</u></b> .....	37
<b><u>3</u></b>	<b><u>APLICAÇÃO DO ULTRASSOM EM MEIOS HETEROGÊNEOS</u></b> .....	<b>40</b>
<b><u>3.1</u></b>	<b><u>Ultrassom em meios heterogêneos anisotrópicos</u></b> .....	40
3.1.1	<b><u>Descontinuidades em Materiais Compósitos</u></b> .....	40
3.1.2	<b><u>Compósito Laminado</u></b> .....	41
3.1.3	<b><u>Reparo Laminado</u></b> .....	42
3.1.4	<b><u>Inspeção em Concreto</u></b> .....	44
<b><u>4</u></b>	<b><u>METODOLOGIA DE PESQUISA</u></b> .....	<b>46</b>
<b><u>4.1</u></b>	<b><u>Equipamentos utilizados</u></b> .....	46
<b><u>4.2</u></b>	<b><u>Inspeção do reparo</u></b> .....	46
<b><u>4.3</u></b>	<b><u>Procedimentos adotados</u></b> .....	47
4.3.1	<b><u>Procedimento de Calibração</u></b> .....	48
4.3.2	<b><u>Procedimento de inspeção no compósito laminado</u></b> .....	49

<b><u>5</u></b>	<b><u>RESULTADOS</u></b> .....	<b>50</b>
<b><u>5.1</u></b>	<b><u>Módulo de elasticidade</u></b> .....	<b>54</b>
<b><u>5.1.1</u></b>	<b><u>Compósito laminado</u></b> .....	<b>54</b>
<b><u>5.1.2</u></b>	<b><u>Concreto</u></b> .....	<b>56</b>
<b><u>6</u></b>	<b><u>ANÁLISE DOS RESULTADOS</u></b> .....	<b>61</b>
<b><u>6.1</u></b>	<b><u>Inspeção do compósito laminado</u></b> .....	<b>61</b>
<b><u>6.2</u></b>	<b><u>Módulo de elasticidade do compósito laminado</u></b> .....	<b>63</b>
<b><u>6.3</u></b>	<b><u>Módulo de elasticidade em concreto</u></b> .....	<b>63</b>
	<b><u>CONCLUSÃO</u></b> .....	<b>65</b>
	<b><u>REFERÊNCIAS</u></b> .....	<b>66</b>



## INTRODUÇÃO

A evolução dos materiais está intrinsecamente ligada à evolução humana. A utilização e o domínio da produção de alguns deles gerou impactos culturais e tecnológicos tão grandes que períodos históricos foram batizados em sua homenagem. Da pedra lascada ao bronze, do aço à fibra de carbono, a descoberta de novos materiais e novos métodos de fabricação impulsiona o estado da arte e apresenta novos desafios, como o de garantir a integridade estrutural destes materiais.

Materiais compósitos vêm ganhando cada vez mais espaço em aplicações industriais, graças a sua alta relação resistência/peso, aos avanços significativos dos processos de fabricação e ao desenvolvimento de matérias primas mais resistentes. No Brasil, apenas no primeiro trimestre de 2014, o setor teve um crescimento de 11,2% comparado com o mesmo período do ano anterior, faturando cerca de R\$ 850 milhões (ALMACO, 2014). Inicialmente utilizada exclusivamente pela indústria aeroespacial e aeronáutica, atualmente, os materiais compósitos estão cada vez mais presentes no dia a dia das pessoas, seja nas estruturas de suas casas, reparos de tubulação, carros, bicicletas, raquetes de tênis, computadores e uma infinidade de outros produtos. Para que isso se tornasse possível foi necessário garantir a durabilidade e confiabilidade destes materiais.

Ensaio Não Destrutivo (END) são métodos e técnicas não invasivas capazes de determinar a integridade de um material, componente ou estrutura ou de mensurar quantitativamente alguma característica de um objeto. Permitem encontrar e dimensionar descontinuidades nos materiais sem comprometer sua estrutura e são amplamente utilizados no controle de qualidade nas indústrias e também de forma preventiva em estruturas e componentes já em serviço (NDT, 2014). Destes métodos, a utilização do ultrassom tem crescido rapidamente, principalmente a partir de 1955, quando as técnicas de geração de imagem por ultrassom evoluíram rapidamente e a necessidade de se extrair informações com esta técnica levaram ao maior desenvolvimento da técnica (MOORE et. Al., 2007) aumentando sua versatilidade e confiabilidade. O ensaio por ultrassom é capaz de encontrar descontinuidades internas em sólidos e de determinar algumas propriedades dos materiais como velocidade do som e módulo de elasticidade, sendo a primeira de grande interesse para determinar a qualidade do concreto. Estas são algumas das razões por que escolhemos o método do

ultrassom para inspeção de materiais compósitos.

A motivação para a realização deste trabalho veio como consequência natural das pesquisas do Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) na área de reforços estruturais e reparos com materiais compósitos. Esta linha de pesquisa vem sendo desenvolvida desde 2008, contando com parcerias diversas, incluindo a Petrobras e o CENPES, que resultaram no desenvolvimento de um sistema de reparo utilizando materiais compósitos de matriz polimérica para dutos de transporte e em sua qualificação pelo CENPES em conformidade com a norma ISO 24817:2006.

Embora a metodologia de reparo esteja bem estabelecida, a falta de procedimentos de inspeção limita sua utilização em função das incertezas acerca de sua integridade estrutural.

Os materiais compósitos têm como característica do seu processo de fabricação a possibilidade de surgimento de descontinuidades como bolhas, falta de adesão de camadas, inclusão de materiais e delaminações. Estas descontinuidades podem comprometer a resistência mecânica do material e, portanto precisam ser monitoradas.

A partir da necessidade de inspecionar o material e garantir a integridade estrutural destes reparos, surgiu a oportunidade de iniciar uma nova linha de pesquisa dentro do LAA voltada para inspeção de materiais compósitos. Atualmente diversos métodos de END são utilizados com excelentes resultados na indústria, mas estes em sua maioria são realizados em materiais homogêneos e isotrópicos, características opostas às apresentadas por materiais compósitos, geralmente heterogêneos e anisotrópicos.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica das técnicas utilizadas na inspeção de materiais. O método de ultrassom é amplamente utilizado na inspeção de materiais homogêneos e isotrópicos. Neste trabalho foi investigada a utilização do método de ultrassom para caracterizar delaminações e o módulo de elasticidade em materiais compósitos laminados. Durante a pesquisa, a fim de confirmar a validade da técnica, foi investigada a utilização do método de ultrassom para a obtenção do módulo de elasticidade de um outro material compósito, o concreto.

Este trabalho teve como objetivo investigar técnicas de inspeção em materiais compósitos e desenvolver um procedimento de inspeção confiável e prático, que pudesse ser utilizado em campo, para o reparo de compósito laminado para dutos de transporte. O método escolhido foi o do ultrassom por suas características; é um método versátil, já consolidado, capaz de medir espessuras e de encontrar descontinuidades

internas no material.

Ao se inspecionar uma estrutura em campo, é interessante não só avaliar a existência de uma descontinuidade, mas também ser capaz de dimensioná-la quando presente. Segundo MOORE et. al.(2007) a técnica de pulso-eco permite medir a espessura de materiais compósitos, identificar e delimitar descontinuidades com uma precisão de  $\pm 0,2$  mm.

As características geométricas do reparo laminado limitaram as técnicas de inspeção que poderiam ser utilizadas. Por não permitir acesso ao lado interno da tubulação para o posicionamento do transdutor, a técnica de transparência se tornou inviável. A técnica de imersão foi descartada pela impossibilidade de montar o aparato técnico necessário em campo. A técnica de pulso-eco foi escolhida, por permitir que a inspeção seja feita utilizando apenas o lado externo da estrutura.

Foram investigadas descontinuidades do tipo laminar, oriundas de descolamento, ou falta de adesão, entre duas camadas de fibras ou na interface entre substrato/adesivo/fibra. Esta definição bastante genérica pode ser encarada como um trinca, uma bolha, uma camada sem adesivo, e uma série de outras descontinuidades, as quais foram agrupadas, para simplificação, e chamadas de delaminações.

Por ser comumente utilizado na determinação do módulo de elasticidade de ligas metálicas, foi investigada também a viabilidade de utilização da técnica de pulso-eco na determinação do módulo de elasticidade do compósito laminado.

## 1 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO EM COMPÓSITOS

Diversos métodos de ensaios não destrutivos são utilizados pela indústria no controle de qualidade de suas matérias primas e produtos acabados. A seguir será feita uma breve descrição das técnicas utilizadas em materiais compósitos.

### 1.1 Ensaio Visual

O ensaio visual consiste da observação de forma direta, a olho nu, ou indireta, com auxílio de equipamentos ópticos, de um objeto, buscando por imperfeições e não conformidades quanto à especificação. É geralmente o primeiro ensaio realizado em um componente, sendo necessário basicamente que a superfície a ser examinada esteja limpa e que as condições de luminosidade estejam adequadas. A Figura 1 mostra um técnico realizando ensaio visual em uma tubulação industrial.

Figura 1 - Inspeção por ensaio visual



Fonte: ENDTEC, 2014.

Técnicos em ensaios visuais são treinados para identificar e classificar discontinuidades de acordo com normas e especificações, considerando também em sua avaliação o processo de fabricação e/ou histórico de utilização do componente ensaiado.

A principal desvantagem deste tipo de inspeção é que ela só detecta problemas superficiais. Além disso, o tamanho dos defeitos que podem ser encontrados está limitado à acuidade visual do técnico, dificultando a detecção de pequenas descontinuidades.

### 1.1.1 Ensaio acústico

Depois do ensaio visual, essa é a técnica mais antiga de inspeção em materiais, inclusive os compósitos. Também conhecida como pulso-eco, ela consiste em transmitir ao material ondas acústicas, e para isso utilizando desde moedas até pequenos transdutores ou ferramentas de impacto específicas, e avaliar o som emitido em busca de imperfeições. Pode ser um método muito simples e barato de ser executado. A Figura 2 mostra um aparelho eletrônico para ensaio acústico.

Figura 2 - Equipamento eletrônico para ensaio acústico



Fonte: JR TECH, 2014.

Suas limitações são quanto aos tipos de descontinuidades que podem ser encontradas e na necessidade de muita prática do técnico para detectar imperfeições menores. Apenas imperfeições relativamente grandes, e com características de delaminação, como bolhas e falta de adesão de camadas, são detectadas por este método.

### 1.1.2 Ultrassom

O ensaio por ultrassom é muito utilizado em materiais compósitos, pois dispõe de diversas técnicas de inspeção, como o A-scan, B-Scan, C-scan, P-scan, para citar algumas (OLYMPUS, 2014). Cada uma dessas técnicas tem características específicas, e são escolhidas de acordo com a necessidade da inspeção e do resultado a ser apresentado. De uma maneira geral, o ensaio consiste em utilizar um transdutor, posicionado diretamente sobre a peça e um acoplante, tipicamente um gel. O transdutor emite um pulso sonoro de alta frequência e recebe o eco deste pulso, medindo o tempo ou a distância percorrida pelo pulso ultrassônico, e assim avaliando possíveis discontinuidades. A Figura 3 mostra uma medição de espessura por ultrassom feita em uma tubulação.

Figura 3 - Medição de espessura por ultrassom



Fonte: OLYMPUS, 2014.

Os aparelhos de ultrassom, dependendo do modelo, oferecem diferentes possibilidades de visualização, como vista em corte (B-Scan), vista superior (C-Scan), e 3D (P-Scan). Este tipo de ensaio também permite que defeitos internos sejam localizados. Algumas destas técnicas podem ser automatizadas, conferindo maior

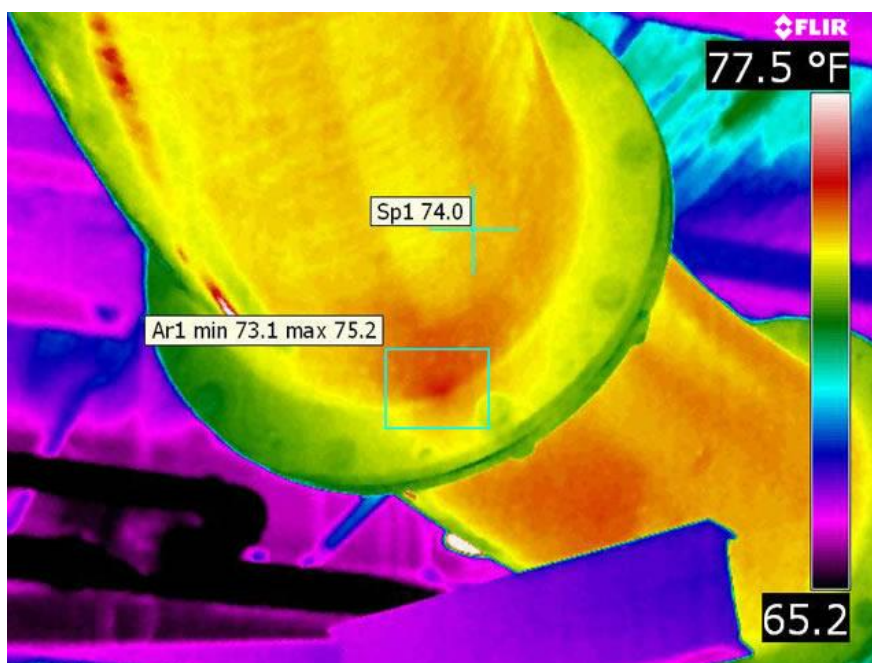
velocidade, repetibilidade e confiabilidade ao ensaio, além de permitir que peças sejam inspecionadas na linha de produção, promovendo assim um melhor controle de qualidade.

O ensaio por ultrassom depende diretamente do tipo de transdutores que são utilizados nos ensaios, e materiais diferentes podem requerer transdutores diferentes. Além disso, o aparelho de ultrassom precisa ser calibrado para cada material diferente, o que diminui drasticamente sua versatilidade e capacidade de detecção, já que esta última também varia de acordo com o material e o tipo de transdutor utilizado.

### 1.1.3 Termografia de Infravermelho

As técnicas termográficas geralmente consistem na aplicação de tensões térmicas no objeto, medição da distribuição da temperatura da superfície e apresentação da mesma, de tal forma que as anomalias que representam as descontinuidades possam ser reconhecidas (MOORE et. al. 2007). A Figura 4 mostra uma imagem termográfica de uma união de tubulação flangeada.

Figura 4 - Imagem termográfica de tubulação



Fonte: FLIR, 2014.

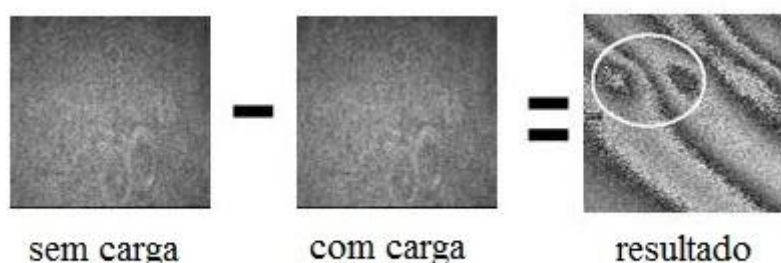
A termografia infravermelha pode ser realizada com a peça em uso, pois não é necessário contato direto do dispositivo termográfico com o objeto a ser inspecionado. Modelos mais avançados das câmeras permitem tanto tirar fotos, como fazer um vídeo, possibilitando a análise da variação da distribuição térmica no objeto. E como a radiação infravermelha é emitida por todo e qualquer corpo físico, não há limitações quanto ao tipo de material inspecionado. Por medir variações de temperaturas, as calibrações geralmente se limitam à uma aferição eventual da escala de temperatura do aparelho e, portanto, torna o método muito rápido e prático de ser executado.

Por outro lado, variações muito pequenas de temperatura podem mascarar resultados, impedindo a detecção de discontinuidades. Falhas muito pequenas podem também ser mascaradas devido ao ruído de fundo. Outra desvantagem é a de que atualmente a termografia infravermelha não possui normas técnica de inspeção para materiais compósitos.

#### 1.1.4 Shearografia

Shearografia é um método de END ótico, que se vale da interferometria a laser para tirar fotos da superfície em seu estado normal e após ser excitada térmica ou mecanicamente, sendo o resultado do processamento destas uma imagem que revela pontos de maior deformação na superfície, que indicam possíveis discontinuidades conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 - simplificação do funcionamento do método de shearografia



DANTEC, 2014.

Sua velocidade de varredura é bastante grande, podendo chegar a 1m<sup>2</sup> por



minuto em alguns casos (DANTEC, 2014). É capaz de encontrar defeitos superficiais e subsuperficiais, e é muito eficaz na avaliação de materiais compósitos que utilizam honey-comb. Os equipamentos podem ou não ser portáteis e podem ser automatizados. A Figura 6 mostra uma inspeção por shearografia.

Figura 6 - Inspeção por shearografia



Fonte: MINTON, 2014.

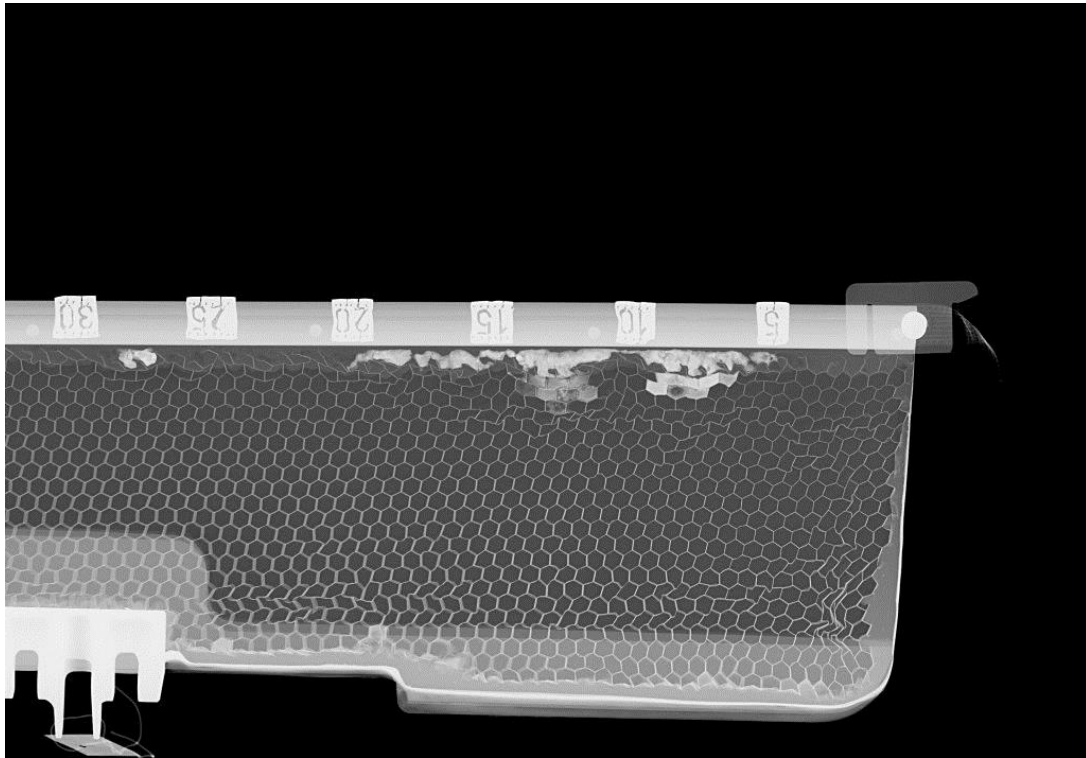
Apesar de rápido e eficaz, o ensaio por shearografia requer técnico bem treinado e experiente para avaliar os resultados. Apesar do processo de inspeção poder ser automatizado, a interpretação dos resultados não pode. No atual estágio da tecnologia ainda não se consegue avaliar com precisão as descontinuidades, e além disso, o equipamento de inspeção é de alto custo, limitando seu uso.

#### 1.1.5 Radiografia

Neste ensaio coloca-se o material a ser ensaiado entre uma fonte emissora de radiação e um filme. Uma parte dos raios emitidos é absorvida pelo material e a outra parte irá atravessá-lo, sensibilizando o filme e produzindo nele uma imagem do material

ensaiado (MOORE et. al., 2007). Após a revelação, o técnico avalia, interpreta e lauda a chapa radiográfica. A Figura 7 mostra uma chapa radiográfica de uma estrutura *honeycomb*.

Figura 7 - Imagem radiográfica de uma estrutura *honeycomb*



Fonte: MINTON, 2014.

É um método capaz de detectar discontinuidades internas, e também capaz de dimensioná-las com razoável precisão. Sua portabilidade permite inspeções em campo, embora unidades fixas também possam ser instaladas em linhas de produção, e unidades automatizadas podem ser montadas para avaliar grandes estruturas.

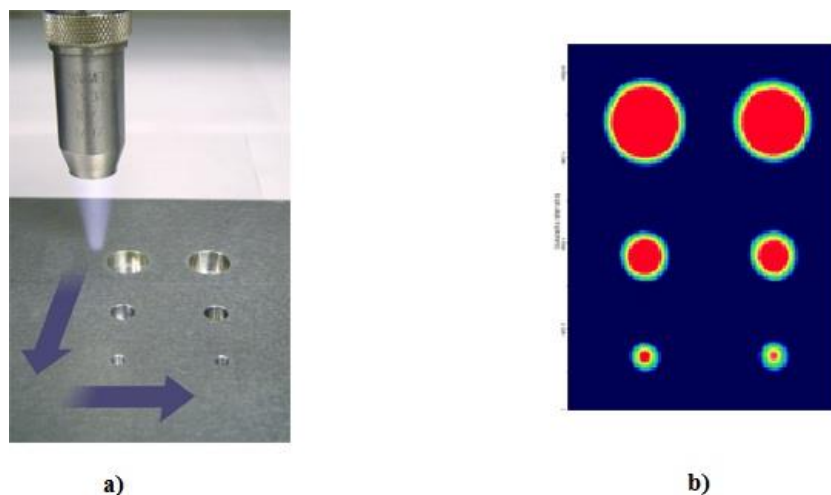
Uma das principais desvantagens do ensaio de radiografia é que por utilizar radiação, oferece riscos à saúde dos técnicos. Tem também o fator de que fontes emissoras portáteis tem pouca potência, limitando em alguns casos a inspeção. Outro aspecto negativo da técnica é a lentidão na interpretação da chapa pois ela precisa ser enviada a um laboratório para ser revelada antes de ser laudada.

## 1.2 Estado da Arte

As técnicas de ensaio não destrutivos tiveram uma evolução significativa nos últimos 10 anos. Essa evolução está sendo impulsionada principalmente pelo rápido desenvolvimento das técnicas de processamento e geração de imagens digitais e de automação dos processos de inspeção.

Estes avanços no processamento de imagens permitem uma avaliação muito mais rápida e precisa da área inspecionada, reduzindo assim o custo de execução dos ensaios e aumentando sua confiabilidade. No ultrassom por exemplo, o técnico não precisa avaliar enquanto inspeciona, podendo manter seus olhos no transdutor, para depois de finalizada a varredura avaliar a imagem na tela, e se necessário investigar pontualmente uma descontinuidade. A Figura 8 mostra a representação gráfica de uma inspeção por ultrassom C-Scan.

Figura 8 - Representação C-Scan de inspeção por ultrassom

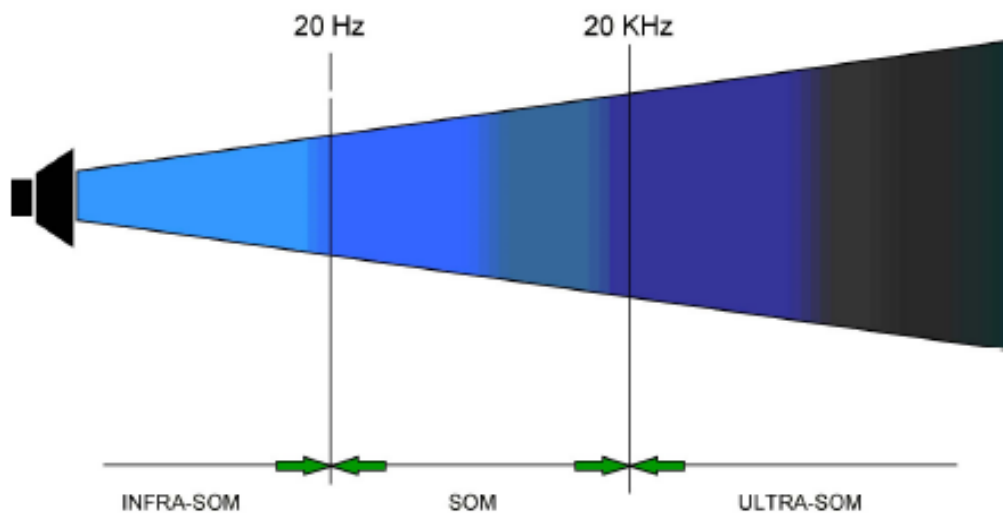


Fonte: O Autor, 2014.

## 2 TEORIA DO ULTRASSOM

O ultrassom é definido como qualquer frequência que exceda a capacidade do ouvido humano de distingui-la, ou seja, que são inaudíveis ao ser humano (SANTIN, 2003). Por som, entende-se a faixa de frequência que nosso aparelho auditivo é capaz de distinguir, que compreende frequências entre 20 Hz e 20 kHz, sendo as frequências abaixo dos 20 Hz denominadas infrassom e, as acima dos 20 kHz chamadas de ultrassom, como demonstra a Figura 9.

Figura 9 - Representação das faixas de frequência do infra ao ultrassom



Fonte: SANTIN, 2003

O ultrassom se propaga em forma de ondas, assim como as ondas sonoras, e as ondas ultrassônicas são utilizadas das mais diversas formas, desde fins industriais como a soldagem de componentes ou a limpeza de peças, a utilizações na medicina com fins diagnósticos e terapêuticos.

### 2.1 Ondas ultrassônicas

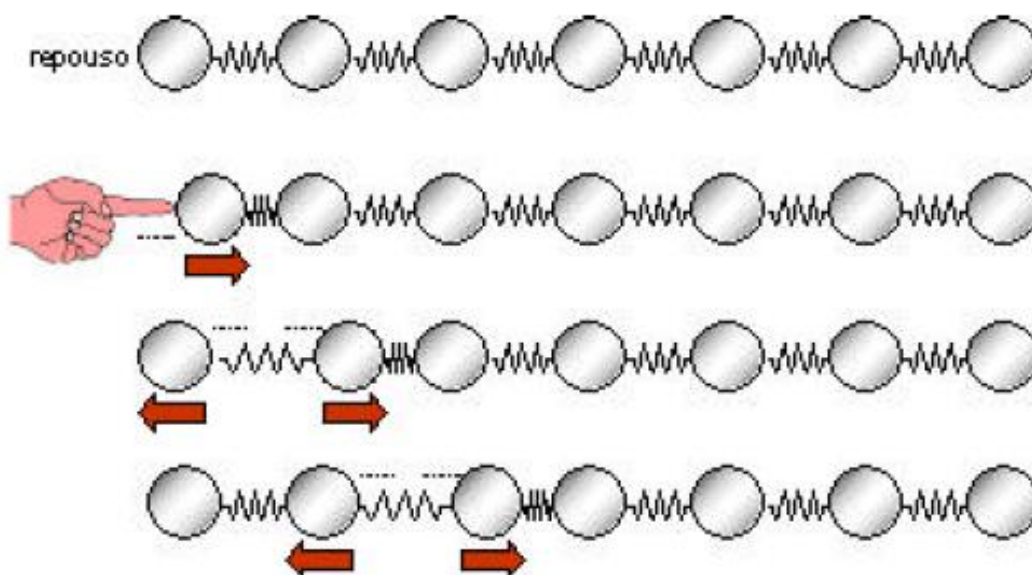
As ondas de ultrassom são ondas mecânicas, e se comportam da mesma maneira que ondas sonoras na frequência audível. Elas se propagam em um meio elástico,

transmitindo a energia mecânica entre as partículas do mesmo. As partículas do meio oscilam à volta de um ponto médio, mas não se deslocam, ou seja, não transportam matéria.

A velocidade de propagação das ondas ultrassônicas é constante em um meio homogêneo e depende das propriedades físicas e mecânicas deste. A velocidade depende também do tipo de onda que está atravessando o meio, tendo as ondas longitudinais velocidade maior do que as ondas transversais quando no mesmo meio. O apêndice A traz uma tabela com alguns valores para velocidades do som em diversos materiais.

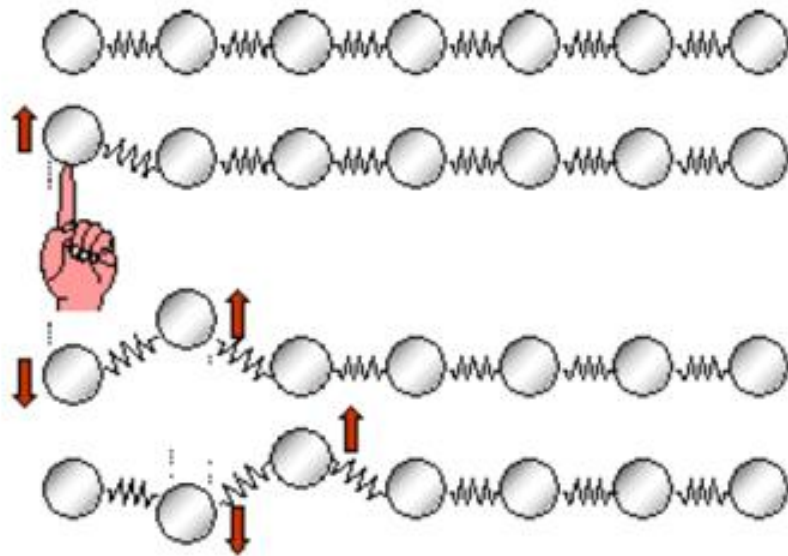
Uma onda é chamada longitudinal, ou de compressão, quando a oscilação ocorre na direção da propagação, e transversal, ou de cisalhamento quando a oscilação ocorre na direção perpendicular à direção de propagação da onda. As ondas de compressão (Figura 10) se propagam em meios sólidos, líquidos e gasosos, enquanto que as de cisalhamento (Figura 11), somente em meios sólidos.

Figura 10 - Representação de uma onda longitudinal



Fonte: ANDREUCCI, 2011.

Figura 11 - Representação de onda transversal



Fonte: ANDREUCCI, 2011.

Como dito anteriormente, a velocidade do som depende exclusivamente do material e do tipo de onda, independente da frequência e do comprimento de onda. A seguir, temos as equações 1 e 2 (SANTIM, 2003) com as quais é possível calcular a velocidade de cada tipo de onda em determinado material.

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

Ondas mecânicas têm propriedades características, que são: difração, dispersão, interferência, reflexão, refração e vibração. Destas, a reflexão e a refração são especialmente interessantes para os ensaios por ultrassom, pois graças a elas, é possível detectar discontinuidades nos materiais.

A reflexão das ondas ultrassônicas acontece quando há uma mudança de meio, como por exemplo, uma interface aço/ar. Quando ondas ultrassônicas atravessam de um meio pra outro, parte das ondas é refletida, e parte é transmitida para o outro meio. A quantidade de energia refletida e a quantidade transmitida dependem diretamente da impedância acústica dos materiais, sendo que quanto maior a diferença entre os valores

das impedâncias acústicas, mais energia é refletida e menos é transmitida ao próximo meio. A impedância acústica ( $Z$ ) de um material é o produto da densidade ( $\rho$ ) e da velocidade do som no meio ( $V$ ), como mostra a equação 3(SANTIM, 2003).

$$Z = \rho \times V \quad (3)$$

As equações 4 e 5 (SANTIM, 2003) são utilizadas para calcular os percentuais de energia refletida e energia transmitida respectivamente para um feixe ultrassônico de incidência normal à superfície.

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (4)$$

$$T = \frac{4(Z_2 \times Z_1)}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (5)$$

Onde:

$Z_1$  = impedância acústica do meio 1

$Z_2$  = impedância acústica no meio 2

R = percentual de reflexão

T = percentual de transmissão.

Como toda energia incidente é refletida e/ou transmitida, podemos utilizar a relação entre R e T (eq. 6)(SANTIM, 2003).

$$R + T = 1 \quad (6)$$

## 2.2 Comprimento de onda e frequência

Estas são características importantes para o ensaio de ultrassom. Embora cada transdutor tenha sua frequência e comprimento de onda fixos, essas características vão determinar qual o transdutor mais indicado para fazer a inspeção, pois quanto menor o comprimento de onda, menor o tamanho de defeito que pode ser encontrado. A relação

entre frequência e comprimento de onda é dada pela equação 7(SANTIM, 2003).

$$V = f \times \lambda \quad (7)$$

Onde:

V = velocidade do som no meio

f = frequência

$\lambda$  = comprimento de onda

No que diz respeito à inspeção, maiores frequências são utilizadas sempre que possível, pois quanto maior a frequência menor o comprimento de onda, e portanto menores discontinuidades podem ser detectadas. Por outro lado, quanto maior a frequência menor o poder de penetração do som, impedindo que altas frequências sejam utilizadas para inspecionar chapas espessas ou materiais de microestrutura grosseira, como os fundidos.

Na escolha do transdutor adequado, portanto, deve-se levar em consideração estes fatores. No caso da medição de espessura, quanto maior a frequência melhor a precisão.

### 2.3 Acoplantes

A baixa impedância acústica do ar faz dele um péssimo transmissor de ondas ultrassônicas, e mesmo uma fina camada de ar faz com que quase 100% da energia dos pulsos ultrassônicos incidentes sobre ela seja refletida. Enquanto essa característica é muito útil para a detecção de discontinuidades, como delaminações, por exemplo, ela também torna necessário o uso de acoplantes durante o ensaio por ultrassom para eliminar a camada de ar entre a face do transdutor e a superfície da peça.

Acoplantes, além de melhorar a transmissão das ondas ultrassônicas do transdutor para a peça, e vice-versa, também funciona como lubrificante nos ensaios por contato direto, diminuindo o atrito e aumentando a vida útil do transdutor. Os acoplantes mais comumente usados são: água, óleo, graxas derivadas de petróleo e de



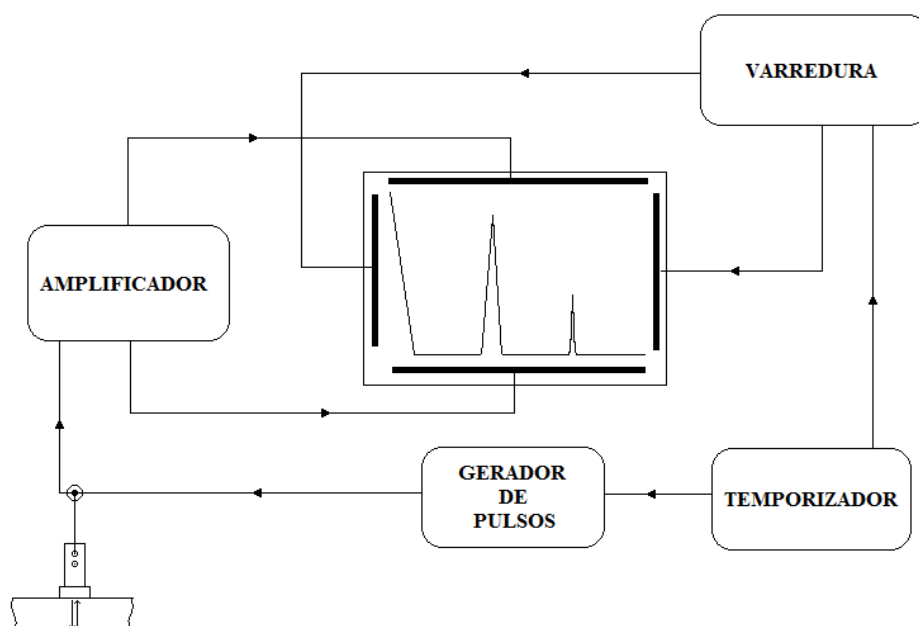
silicone, espessantes como o carboxi-metil-celulose e outros produtos líquidos ou pastosos.

Na inspeção por contato direto, o acoplante deve formar um filme fino entre a superfície da peça e o transdutor, de modo a garantir a melhor transmissão possível das ondas ultrassônicas. Na escolha do acoplante, algumas características como rugosidade superficial e neutralidade química com o material inspecionado devem ser levados em consideração. Em superfícies com rugosidades superficiais muito altas, acoplantes mais viscosos devem ser usados.

## 2.4 O aparelho de ultrassom

O aparelho de ultrassom consiste em um sistema capaz de emitir e receber pulsos ultrassônicos através de um ou mais transdutores e de exibir em uma tela os sinais recebidos. O sistema é composto de uma fonte de energia, um temporizador, circuito gerador de pulsos, circuito receptor/amplificador, circuito de varredura e um mostrador de sinais como ilustra a Figura 12.

Figura 12 - Circuito básico de funcionamento de um aparelho de ultrassom



Fonte: O Autor, 2014.

## 2.5 Inspeção por ultrassom

A técnica de inspeção por ultrassom pode ser usada com diversas finalidades. Dentre suas aplicações mais comuns estão a medição de espessura de materiais, desde paredes de tubos até mesmo espessura de camada de tinta, e a detecção de discontinuidades nos mais diversos materiais. Existem também outras aplicações menos triviais, como por exemplo, estimar o módulo de elasticidade de um material.

Basicamente, o equipamento de ultrassom consiste de um transdutor piezoelétrico, um aparelho de ultrassom e um cabo que conecta os dois. O transdutor tem a função de transformar impulsos elétricos em ondas mecânicas e vice versa. Estes impulsos são enviados pelo aparelho de ultrassom, que recebe de volta e interpreta os sinais do transdutor mostrando o resultado na tela do aparelho. O aparelho consiste basicamente de um gerador de sinais, um amplificador um temporizador e um circuito de varredura.

O aparelho de ultrassom pode ter diversos tipos de mostradores, sendo cada um deles característico de determinada técnica de varredura. Para o método de pulso-eco, os principais tipos de mostradores são A-scan, B-scan, C-scan e P-scan. De uma maneira bem simplificada o A-scan (Figura 13) tem uma representação cartesiana amplitude *versus* tempo, o B-scan (Figura 14) por sua vez tem a representação como de uma vista em corte da seção inspecionada, o C-scan (Figura 15) uma vista superior da área de varredura, e o P-scan (Figura 16) uma vista interna tridimensional da peça.

Figura 13 - Representação do A-scan



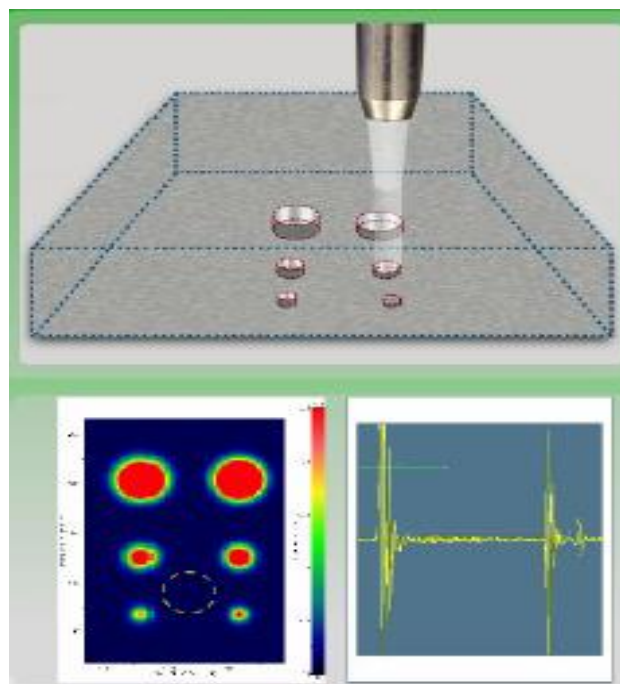
Fonte: OLYMPUS, 2014.

Figura 14 - Representação do B-scan



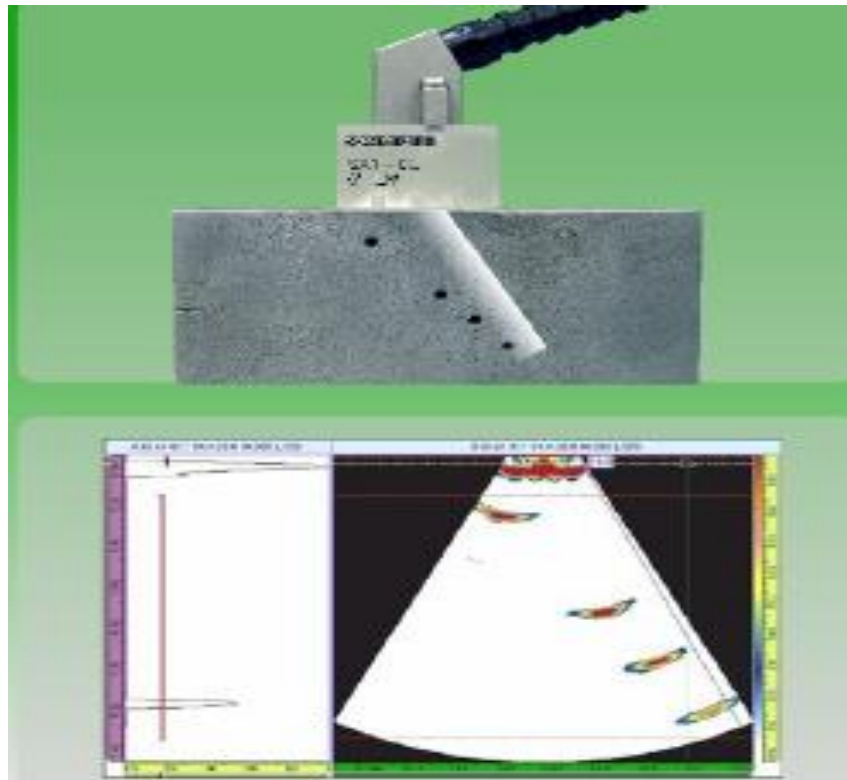
Fonte: OLYMPUS, 2014.

Figura 15 - Inspeção e representação do C-scan



Fonte: OLYMPUS, 2014.

Figura 16 - Inspeção e Representação do P-scan

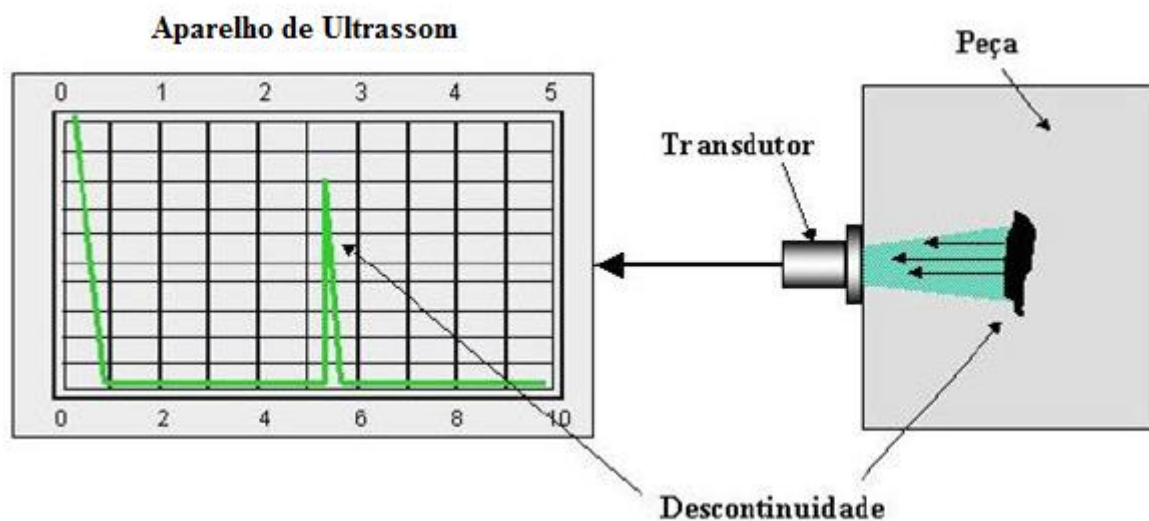


Fonte: OLYMPUS, 2014.

## 2.6 O método pulso-eco

No método pulso-eco, o transdutor emite pulsos sônicos em intervalos regulares de tempo, que são transmitidos à peça inspecionada através do acoplante. Quando o pulso encontra uma superfície refletora, parte ou toda a energia é refletida, sendo captada pelo transdutor, que converte a energia mecânica em elétrica que é indicada como um pulso na tela do aparelho (Figura 17).

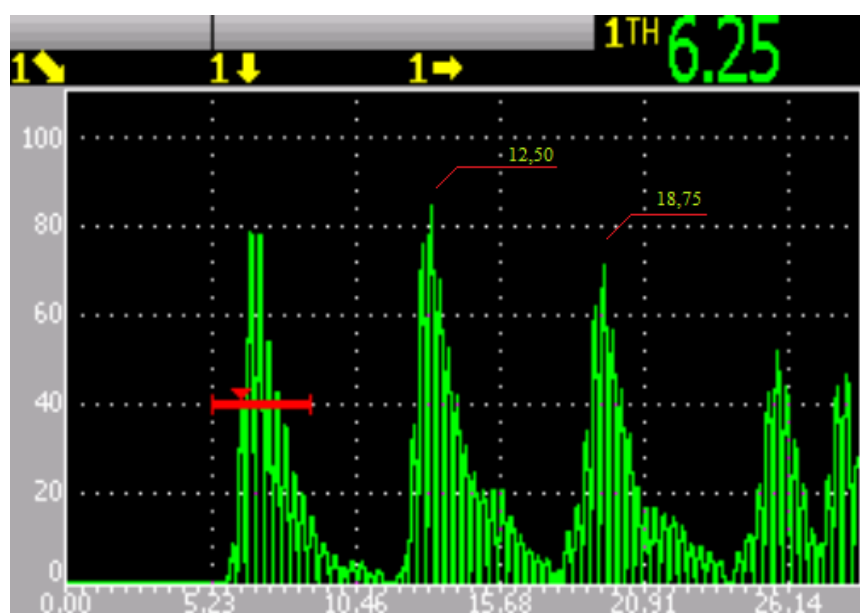
Figura 17 - Ilustração da técnica de pulso-eco



Fonte: ANDREUCCI, 2011.

Devido ao fenômeno da reflexão, parte da energia das ondas sonoras é refletida de volta para o interior da peça, fazendo com que o pulso fique “ricocheteando” no material e cause diversos picos na tela, múltiplos da distância percorrida pelo pulso inicial (Figura 18). Estes picos são também chamados de ecos de fundo. Devido à atenuação do sinal no material, a amplitude dos ecos vai diminuindo a cada reflexão.

Figura 18 - Picos de reflexões do sinal de ultrassom para espessura de 6,25mm



Fonte: O Autor, 2014

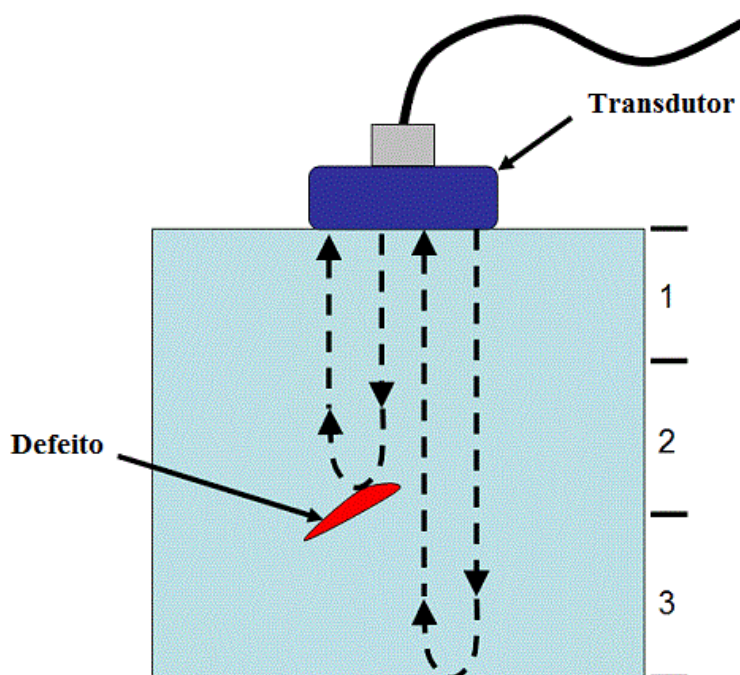
Este é o método mais amplamente utilizado devido a sua simplicidade. São necessários poucos componentes e acesso a apenas uma das superfícies da peça, o que aumenta em muito as possibilidades de inspeção.

Tanto a técnica de contato direto quanto a de imersão utilizam o método de pulso-eco. Ambas podem também ter representações A, B, C e P-scan, embora a representação C-scan seja mais comumente associada à técnica de imersão.

## 2.7 Técnica por contato direto

Nessa técnica, o transdutor é posicionado diretamente sobre a peça (Figura 19) a ser inspecionada com uma fina camada de acoplante entre eles. Por ser uma camada pouca espessa, deve-se tomar cuidado de modo a garantir que tanto a superfície da peça quanto a do transdutor estejam em contato com o acoplante, principalmente no caso de superfícies com alta rugosidade e superfícies irregulares. A face do transdutor deve tocar completamente a peça para garantir um bom acoplamento.

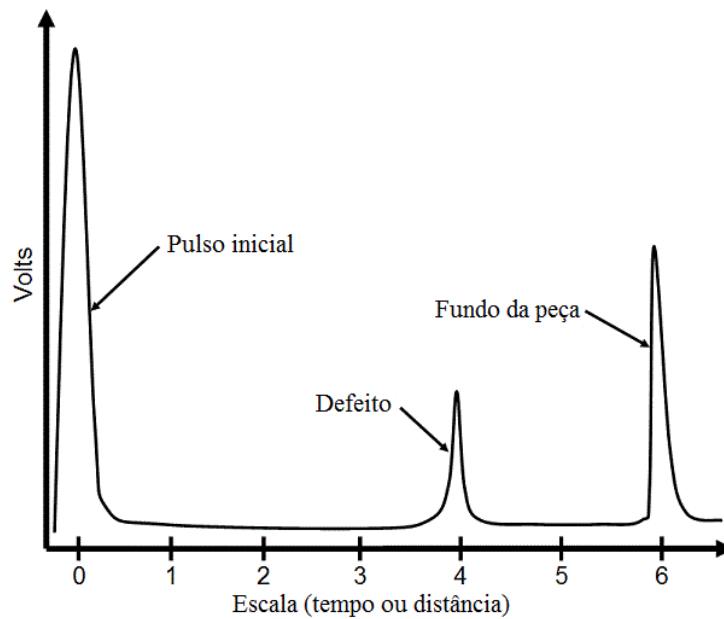
Figura 19 - Ilustração da técnica por contato direto



Fonte: NI.com, 2014.

A inspeção da peça ilustrada na figura 12 é representada na tela do aparelho por dois picos, sendo um deles o eco relativo ao fundo da peça e o outro ao defeito. Como o caminho percorrido pelo som até o defeito é menor que o percorrido até o fundo da peça, o pico relativo ao defeito aparece antes na tela, entre o pulso inicial e o eco do fundo da peça (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**14). Quando o defeito fosse rante o suficiente para refletir todo o pulso sonoro, apareceria apenas o pico do defeito, com maior amplitude.

Figura 20 - Representação da tela (A-scan) da inspeção ilustrada na figura 12



Fonte: ANDREUCCI, 2011.

A técnica por contato direto é a mais utilizada atualmente devido à simplicidade tanto da técnica quanto do equipamento necessário. Comumente utilizada na indústria para medição de espessura, desde tubulações a vidros de lâmpadas, e na inspeção de chapas laminadas. Esta técnica depende de uma superfície limpa e regular para obter bons resultados.

## 2.8 Técnica de imersão

No ensaio ultrassônico por imersão não há contato direto entre o transdutor e a

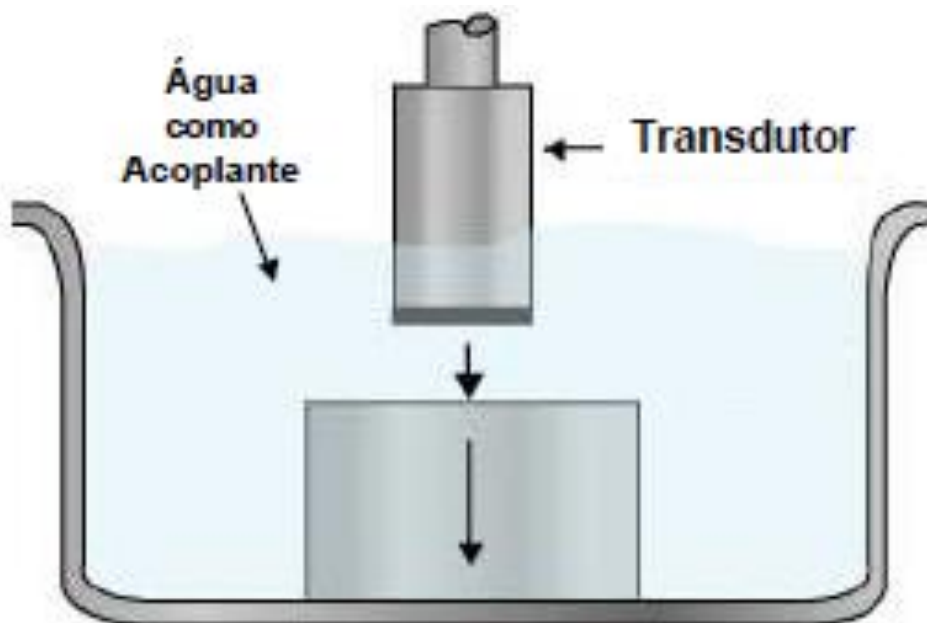
peça examinada. Tanto o transdutor quanto a peça inspecionada ficam imersos em um líquido acoplante, geralmente água, permitindo transmissão adequada dos pulsos ultrassônicos. Essa técnica é muito utilizada em inspeções automatizadas em linhas de produção.

A distância entre o transdutor e a superfície de inspeção é comumente chamada de coluna d'água. Enquanto na técnica de contato direto a pequena espessura da camada acoplante produz efeito desprezível na tela do aparelho de ultrassom, na técnica por imersão essa distância é suficiente para representar uma interface e, portanto, faz com que apareçam pulsos relativos à coluna de líquido na tela. A distância da coluna de líquido deve ser suficientemente grande de modo que seja possível distinguir os ecos do acoplante dos ecos da peça. A equação 8(MOORE, 2007) permite calcular a altura adequada da coluna de líquido.

$$d_l = \frac{V_l}{V_m} N d_m \quad (8)$$

Onde,  $d_l$  é a altura da coluna de líquido,  $V_l$  é a velocidade do som no meio acoplante,  $V_m$  é a velocidade do som no material inspecionado,  $N$  é o número de pulsos desejados e  $d_m$  é a espessura do material inspecionado.

Figura 21 - Ilustração da técnica de imersão

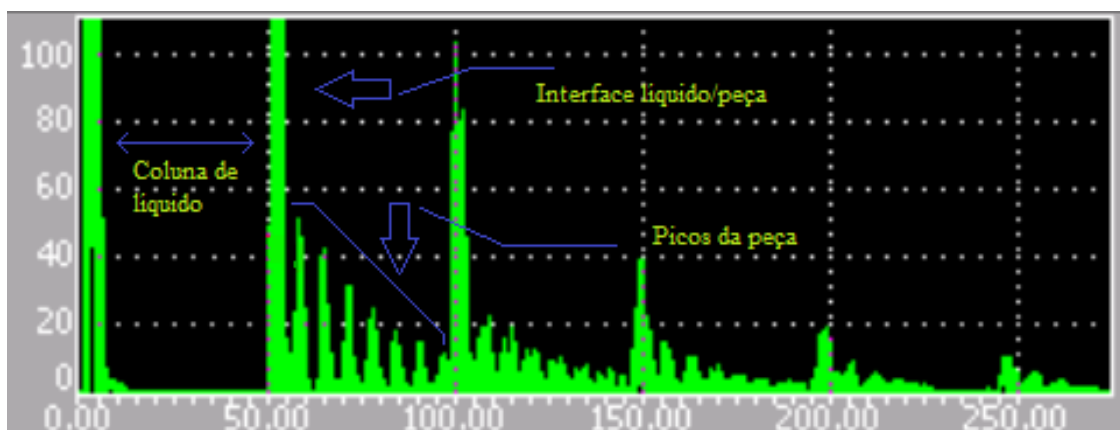


Fonte: ANDREUCCI, 2011.



Na técnica de imersão, a representação A-scan na tela do aparelho é muito parecida com a da técnica por contato direto, sendo diferente apenas na distância entre o pulso inicial e o primeiro pico, que é referente à coluna de líquido. O primeiro pico é referente à reflexão da interface entre o líquido acoplante e a peça, e entre os ecos da coluna de líquido temos as reflexões do material como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Ecos da coluna de líquido e da peça



Fonte: O Autor, 2011.

A técnica de imersão proporciona um acoplamento muito bom, mesmo em superfícies irregulares como, por exemplo, superfícies afetadas por corrosão.

### **3 APLICAÇÃO DO ULTRASSOM EM MEIOS HETEROGÊNEOS**

#### **3.1 Ultrassom em meios heterogêneos anisotrópicos**

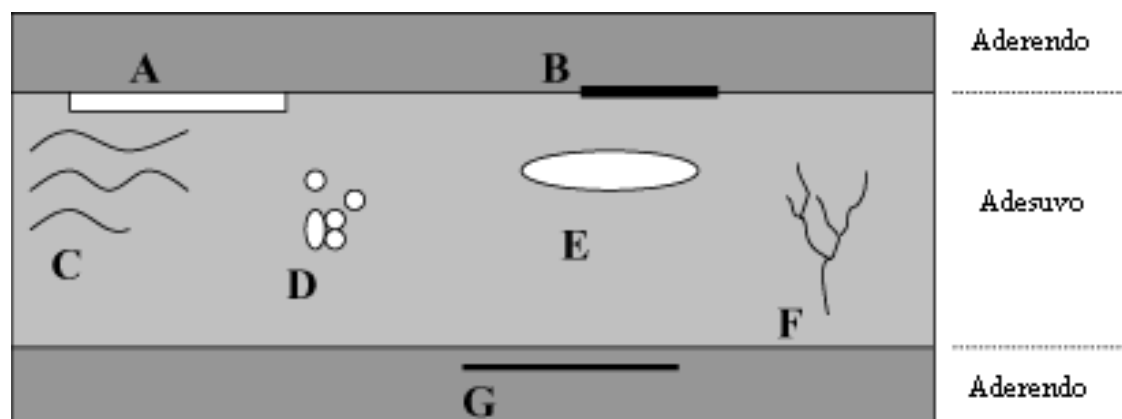
O comportamento das ondas ultrassônicas já foi amplamente estudado e documentado e, portanto, está muito bem estabelecido no que diz respeito à inspeção de materiais homogêneos e isotrópicos, como polímeros e ligas metálicas. Essa afirmação, entretanto não é verdadeira quando feita em relação aos materiais compósitos, com estrutura heterogênea e anisotrópica.

Conforme dito anteriormente, as ondas ultrassônicas tem velocidade constante em um meio heterogêneo, e quando encontram interfaces entre meios distintos parte da energia acústica é refletida e parte é transmitida para o outro meio. Reflexão e transmissão são dadas em função da impedância acústica dos meios sendo maior a reflexão quanto maior a diferença entre as impedâncias. O entendimento deste conceito é fundamental para compreender porque materiais heterogêneos apresentam um grande desafio às técnicas comumente utilizadas de inspeção por ultrassom, visto que materiais compósitos são como uma miríade de interfaces para os feixes ultrassônicos, aumentando consideravelmente o nível de absorção e de dispersão dos pulsos. Estas características limitam, mas não impossibilitam a utilização do ultrassom em materiais heterogêneos.

##### **3.1.1 Descontinuidades em Materiais Compósitos**

Diversos tipos de descontinuidades podem ser encontradas em materiais compósitos, podendo ser causadas pelos mais diversos acontecimentos. Falhas durante a fabricação, inclusões, matérias primas fora da especificação ou fora da validade e impactos mecânicos são apenas algumas das possíveis causas. Entre as descontinuidades estão: bolhas, trincas, porosidades, falta de adesão, descolamento, adesão fraca, vazio e delaminação. A Figura23 mostra as diversas categorias de descontinuidades.

Figura 23 – Tipos de discontinuidades encontradas em materiais compósitos



Legenda: (a) - Falta de adesão; (b) – descolamento; (c) - adesão fraca; (d) – porosidade. (e) – vazio; (f) – trincas; (g) – delaminação.

Fonte: PETROBRAS, 2011.

Apesar de tantas denominações, sob o ponto de vista da inspeção por ultrassom, podemos considerar todas essas categorias, ou denominações, como delaminações se definirmos como delaminação a existência de uma interface sólido/ar. Para fins de simplificação essa foi a abordagem adotada para este trabalho e que será utilizada daqui em diante.

### 3.1.2 Compósito Laminado

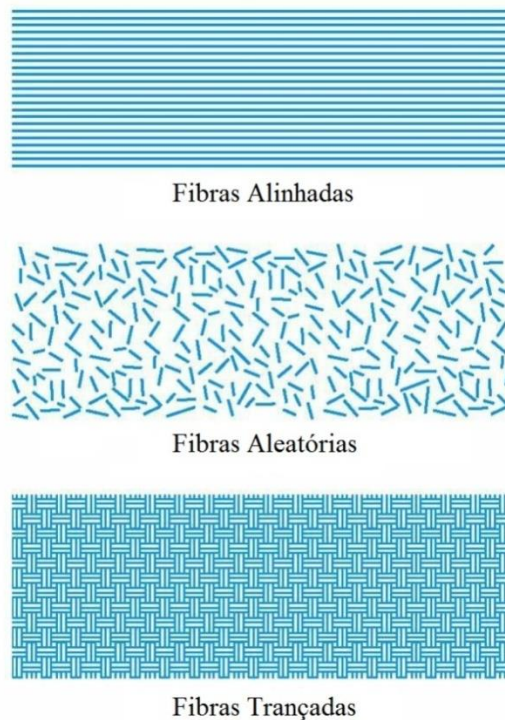
Muito dos bens fabricados atualmente demandam o emprego de materiais com combinações incomuns de propriedades, que não podem ser atendidas por ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais. As combinações e as faixas das propriedades estão sendo ampliadas com o desenvolvimento de compósitos. Por se tratar de um material projetado, propriedades especiais são obtidas e a sua aplicação na indústria, especialmente nos segmentos aeroespacial, automotivo e de engenharia, é crescente.

Os materiais compósitos ou conjugados são combinações de dois ou mais materiais com propriedades físicas e mecânicas bastante distintas. A maioria destes materiais consiste de um elemento de reforço envolvido por uma matriz, constituída de resina colante, com o objetivo de obter características específicas e propriedades desejadas. Geralmente, os componentes não se dissolvem um no outro e podem ser

identificados, fisicamente, por uma interface entre os mesmos, bem definida (ROHEM, 2010).

São essencialmente três os tipos de compósitos com fibras utilizados pela indústria, sendo eles: com fibras alinhadas, com fibras curtas e aleatórias, e com fibras trançadas. A Figura 24 ilustra estas três configurações.

Figura 24 - Configurações de fibras para compósitos de matriz polimérica



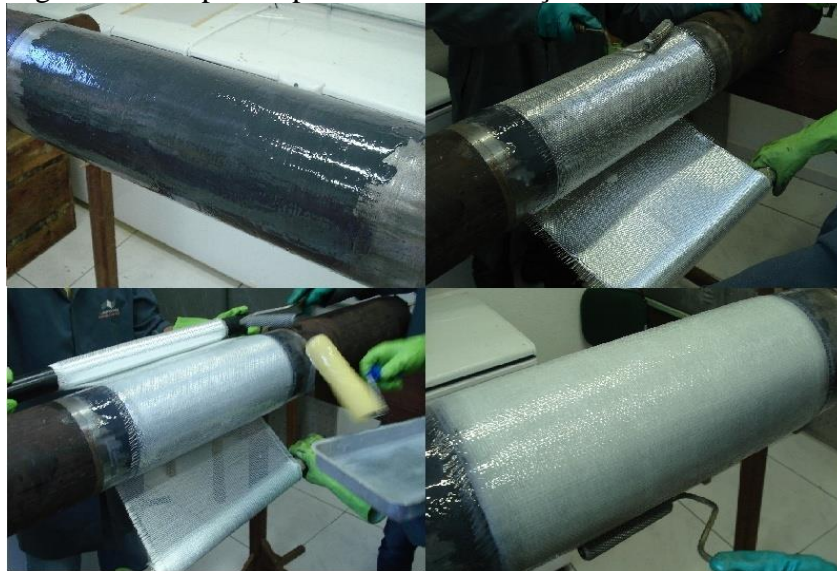
Fonte: FOG, 2014.

### 3.1.3 Reparo Laminado

O reparo desenvolvido pelo LAA utiliza fibras trançadas na configuração de 2:1. Isso significa que ela tem o dobro de fibras em uma direção, nesse caso a longitudinal e, portanto, o dobro da resistência mecânica também nesta direção. Esta configuração foi escolhida em função do reparo ter sido desenvolvido para tubulações, que são abordadas como vasos de pressão cilíndricos de paredes finas nos quais, de acordo com (HIBBELER, 2003), a tensão circunferencial é duas vezes maior do que a axial.

O reparo consiste em laminar diversas camadas de fibra de vidro impregnada em resina epóxi ao redor do local cuja integridade estrutural foi comprometida. Inicialmente é efetuada a limpeza da área a ser reparada por jateamento, e em seguida é feita limpeza química da área jateada. Em seguida é aplicada uma camada de adesivo epóxi, um primer, a fim de homogeneizar a superfície com perda de espessura. Na sequência é feita a laminação da fibra de vidro, sendo a cada volta o tecido impregnado em resina epóxi, até que a espessura determinada pelo projetista seja alcançada. A Figura 25 ilustra o passo a passo do processo de laminação, e a Figura 26 mostra o processo finalizado.

Figura 25 - Etapas do processo de laminação



Fonte: ROHEM, 2010.

Figura 26 - Laminação concluída



Fonte: ROHEM, 2010.

### 3.1.4 Inspeção em Concreto

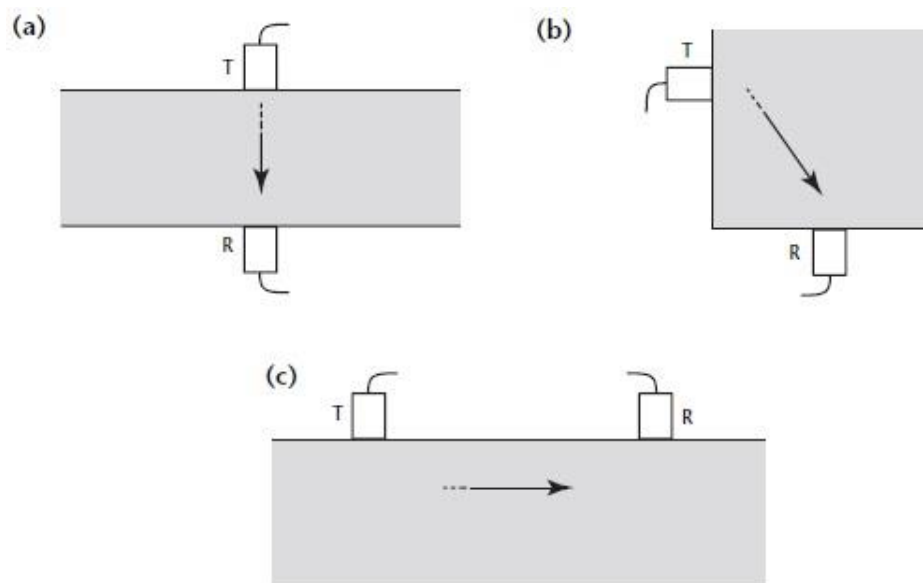
Embora as técnicas comuns de ultrassom sejam limitadas pela natureza heterogênea do concreto, algumas técnicas modificadas já foram utilizadas para detectar trincas e falhas internas, e também para monitorar mudanças como a deterioração em ambientes agressivos, para estimar a resistência do concreto *in loco* e para monitorar a rigidez e a resistência do material ao longo do tempo (IAEA, 2002).

As frequências utilizadas na inspeção do concreto variam tipicamente entre 25 e 100 kHz, sendo 500 kHz a maior frequência de inspeção viável, visto que o comprimento de ondas nessa faixa de frequência é da ordem de dezenas de milímetros, e, portanto sofre interferência direta do agregado graúdo, que causa dispersão acentuada do sinal de ultrassom, prejudicando os resultados obtidos ou impossibilitando completamente a inspeção.

Uma das principais formas de se avaliar a resistência do concreto com ultrassom é através da determinação da velocidade do som no meio. Estudos como o de LIN et. al. (2007) correlacionam a resistência mecânica do concreto com sua velocidade do som, sendo diretamente proporcional a ela. E como medir a velocidade do som é algo relativamente simples de se fazer com ultrassom, existindo inclusive equipamentos específicos para essa finalidade, é possível não só avaliar a qualidade do concreto, mas também monitorá-la ao longo do tempo.

Existem basicamente três técnicas utilizadas para isso, onde a posição do transdutor é o que varia, sendo elas as de medição direta, semi-direta e indireta. A Figura 27 ilustra as configurações.

Figura 27 - Configurações de medição de velocidade do som em concreto



Legenda: (a) - transmissão direta; (b) - semi-direta; (c) - indireta.  
Fonte: IAEA, 2002.

## **4 METODOLOGIA DE PESQUISA**

### **4.1 Equipamentos utilizados**

Para a realização dos ensaios no compósito laminado foi utilizado um aparelho da marca Olympus, modelo Epoch XT, com transdutores piezoelétricos da marca Panametrics, de frequências de 1, 2,25 e 5 MHz.

Nos ensaios em concreto foi utilizado um aparelho da marca Proceq, modelo PunditLab+, com transdutores Proceq de 54 kHz. Foi também utilizado o *software* Punditlink versão 2.4 para armazenar e tratar os dados da inspeção de concreto.

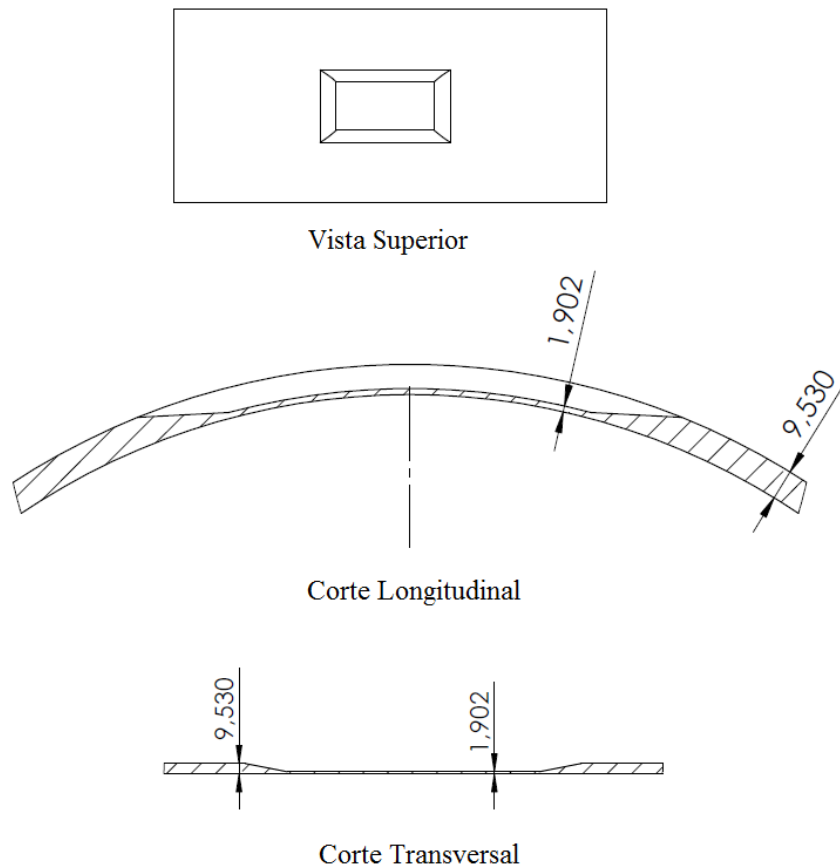
### **4.2 Inspeção do reparo**

O foco principal deste estudo foi determinar um procedimento de inspeção que permitisse encontrar e dimensionar delaminações dentro do reparo, em especial as que viessem a ocorrer na interface entre o substrato metálico e o laminado de compósito, pois baseado na experiência adquirida durante os testes de desenvolvimento do reparo, esse tipo de delaminação se propaga como uma trinca no caso de um vazamento e, caso ocorra, compromete a eficiência do reparo.

Os testes foram realizados em corpos de prova utilizados para a qualificação do reparo para perda de espessura. A parede do tubo foi usinada de forma que tivesse apenas 20% de sua espessura original, e o reparo foi feito sobre a área da redução de espessura. A Figura 28 mostra a geometria da usinagem feita para simular perda de espessura dos tubos.



Figura 28 - Vistas da usinagem de perda de espessura dos corpos de prova utilizados



Fonte: Autor, 2014.

De acordo com MOORE et. al. (2007), por se tratar de um material muito atenuante, é preferível que se utilize baixas frequências entre 0,5e 2,5MHz para a inspeção de materiais compósitos por ultrassom, de forma a obter maior penetração do feixe sônico no material.

#### 4.3 Procedimentos adotados

Apesar do crescimento de sua utilização, a inspeção de materiais compósitos por ultrassom carece de normas que orientem e padronizem sua prática. Existem diversos procedimentos de inspeção, elaborados de maneira empírica pelas empresas que prestam serviços de ensaios não destrutivos e inspeção, e estas os mantêm como

segredos industriais.

Moore et. al. (2007) diz que para uma inspeção onde o feixe longitudinal, com incidência normal à superfície do material, a anisotropia deste pode ser desconsiderada e o ensaio pode ser realizado como em um material isotrópico. Como o modelo de inspeção adotado atende perfeitamente a estes requisitos, procedimentos comumente utilizados na indústria, como a PR-036, serviram de referência para a metodologia elaborada para materiais compósitos.

O procedimento é baseado em um conceito matemático relativamente simples, no qual se conhecendo duas de três variáveis, podemos calcular a terceira. O conceito físico pode ser demonstrado através da Equação 9.

$$V = \frac{D}{t} \quad (9)$$

Onde:

V = velocidade do som

D = distância percorrida pelo som

t = tempo decorrido

Desta forma, para qualquer um dos parâmetros que se queira conhecer, basta medir os outros dois para que o primeiro seja calculado. O parâmetro desconhecido varia com o tipo de inspeção que será feita e afeta a maneira de se calibrar o aparelho. Por exemplo, no caso do reparo laminado, o parâmetro de interesse é a velocidade do som, pois é um dado de entrada necessário à calibração do aparelho então precisamos conhecer a espessura do bloco de calibração e o tempo gasto para percorrê-lo.

#### 4.3.1 Procedimento de Calibração

O procedimento descrito a seguir é para a calibração de um aparelho de ultrassom com representação do tipo A-Scan, utilizando a técnica de pulso-eco.

Para calibrar o aparelho é necessário além do transdutor, cabo e acoplante, um bloco de calibração feito do mesmo material a ser inspecionado e com espessura conhecida. O

aparelho deve ser calibrado para medir a espessura da camada de compósito e, portanto, a velocidade do som no material deve ser conhecida. O tempo decorrido entre o envio do pulso e o recebimento do mesmo pelo transdutor é medido automaticamente pelo aparelho quando este é ajustado para medição de espessura.

Caso a velocidade do som no material já seja conhecida, basta inserir no aparelho para a velocidade adequada e calibrá-lo até que a espessura indicada na tela seja igual à do bloco de calibração. Se a velocidade do som no material for desconhecida, o aparelho de ultrassom deve ser ajustado para medir o tempo entre emissão e recebimento do pulso. Aplicar uma camada generosa de acoplante entre o transdutor e o bloco e fazer a medição do tempo decorrido. Calcular a velocidade do som no material utilizando a Equação 9.

#### 4.3.2 Procedimento de inspeção no compósito laminado

Com o aparelho calibrado, o transdutor deve ser posicionado sobre a peça, sempre com uma camada de acoplante entre eles para garantir uma boa transmissão do pulso ultrassônico. Ajustar o ganho do aparelho até que a amplitude do primeiro eco seja de 70%. Este ajuste vai permitir que variações de amplitude positivas e negativas sejam percebidas, sendo uma variação positiva (aumento do sinal) indicação de delaminação, e uma variação negativa (diminuição do sinal) indicação de maior espessura de material no local.

A varredura do transdutor sobre a peça deve ser feita longitudinalmente e com sobreposição de 20% do diâmetro do transdutor sobre a área anterior, para garantir que toda a superfície do reparo foi inspecionada.

No caso de se encontrar alguma descontinuidade, a posição deve ser marcada e a área delimitada, para que o reparo seja feito na área afetada.

## 5 RESULTADOS

O aparelho de ultrassom foi utilizado para medir o tempo necessário para percorrer uma amostra do material, e a espessura dos pontos de medição foi medida com um paquímetro. Tanto o aparelho quanto os transdutores utilizados para estas medições são específicos para inspeção em materiais metálicos, o que não impossibilitou a inspeção, mas limitou as frequências utilizadas às comumente utilizadas para inspecionar materiais isotrópicos. Foram utilizados transdutores Panametrics com frequência de 1MHz, e o aparelho foi um Olympus Epoch XT. A Figura 29 mostra o aparelho e o transdutor utilizado no ensaio sendo calibrado num bloco padrão de aço 1018.

Figura 29 - Aparelho de ultrassom e transdutor utilizados



Fonte: O Autor, 2014.

Como foi utilizada a técnica do pulso-eco, a distância percorrida  $L$  foi multiplicada por dois, visto que o tempo indicado pelo aparelho de ultrassom foi o equivalente ao tempo necessário para o pulso percorrer a espessura da peça, refletir no fundo e voltar novamente até o ponto de contato do transdutor. Os resultados das medições e do cálculo das velocidades são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados das medições de velocidade do som no compósito laminado

Ponto	t [s]	L [m]	V [m/s]
1	4,68	5,05	2158,12
2	4,77	5,15	2159,329
3	4,76	5,15	2163,866

Fonte: O Autor, 2014.

A média da velocidade do som calculada foi de 2160 m/s. Utilizamos este valor para calcular o comprimento de onda do feixe de 1 MHz no meio utilizando a Equação 7, o que nos dá um comprimento de onda de 2,16 mm. Segundo SANTIM (2003) o tamanho mínimo da descontinuidade que pode ser detectada por um feixe ultrassônico é igual à metade de seu comprimento de onda e, portanto a menor descontinuidade que poderá ser detectada com esta frequência neste meio é de 1,08 mm.

Para localizar as descontinuidades no reparo, foi utilizada uma abordagem baseada na transmissão e reflexão dos feixes sonoros. Conforme já foi discutido, quanto maior a diferença entre as impedâncias acústicas ( $Z$ ) de dois materiais menor é a transmissão e maior é a reflexão sonora. É sabido também que gases tem um impedância acústica que difere várias ordens de grandeza dos sólidos, visto que a impedância acústica é um produto da densidade do material e da velocidade do som no mesmo. No caso da delaminação temos uma interface ar/sólido e, portanto, praticamente toda a energia é refletida de volta para o meio, enquanto que no material não defeituoso a interface está intacta e parte da energia sônica é transmitida para o outro meio, neste caso o substrato metálico. Assim sendo, o nível de energia refletida deve ser maior quando há uma descontinuidade, pois mais energia é refletida ao transdutor do que quando a interface está intacta.

Para comprovar este conceito, foi utilizado um tubo de PVC comum, que foi laminado com material compósito, sendo uma das extremidades tratada de forma que o laminado não aderisse ao PVC, criando assim uma delaminação, como mostra a Figura30.

Figura 30 - Corpo de prova de PVC laminado com material compósito



Fonte: O Autor, 2014.

Foram feitas medições na área sã e na área defeituosa para comprovar o conceito. Os resultado das medições podem ser comparados nas Figuras31 e 32.

Figura 31 - Sinal no modo de Rádio Frequência (RF) obtido no ponto com delaminação



Fonte: O Autor, 2014.

Figura 32 - Sinal RF obtido no ponto sem delaminação



Fonte: O Autor, 2014.

Após a confirmação do conceito, a técnica foi utilizada para inspecionar corpos de prova de perda de espessura a fim de encontrar delaminações e também a área de perda de espessura.

Foi possível localizar e delimitar através do reparo, a área usinada para simular a perda de espessura. As Figuras 33 e 34 mostram os sinais retificados obtidos em um dos ensaios.

Figura 33 - Sinal de onda retificada do trecho sem perda de espessura



Fonte: O Autor, 2014.



Figura 34 - Sinal com onda retificada do trecho limítrofe da perda de espessura



Fonte: O Autor, 2014.

### 5.1.1 Módulo de elasticidade

#### 5.1.1.1 Compósito laminado

Segundo MOORE et. al. (2007), a determinação do módulo de elasticidade é uma prática relativamente comum na indústria quando em materiais homogêneos e isotrópicos, podendo ser calculado de maneira relativamente simples desde que se conheça alguns parâmetros do material ensaiado. O módulo de elasticidade pode ser calculado através da Equação 10.

$$E = \frac{V_L \rho (1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (10)$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade

$V_L$  = Velocidade longitudinal

$\rho$  = Densidade específica do material

$\nu$  = Coeficiente de Poisson



A mesma metodologia foi aplicada ao material compósito a fim de investigar se o mesmo era válido para materiais heterogêneos e anisotrópicos. Para realização dos cálculos do módulo de elasticidade foi feita uma média das velocidades calculadas para os três pontos e os valores do coeficiente de Poisson e da densidade do material, assim como os valores ensaiados para o módulo de elasticidade, estão conforme (Rohem, 2010).

Foi feita a medição da velocidade do som em corpos de prova de cisalhamento feitos com compósito laminado a fim de calcular o módulo de elasticidade. Foram utilizados corpos de prova de tração não ensaiados, os quais os módulos de elasticidade eram conhecidos. A velocidade do som foi medida em três pontos distintos de cada um dos corpos de prova, e as respectivas espessuras de cada ponto foram medidas com um paquímetro. A Tabela 2 mostra os resultados das medições e dos cálculos das velocidades.

Tabela 2 - Espessuras e tempos medidos e velocidades calculadas para os corpos de prova

Espessura (mm)	Tempo		CP
	( $\mu$ s)	$V_L$ (m/s)	
3,10	3,340	1856,29	1
3,15	3,405	1850,22	
2,85	3,212	1774,60	
3,05	3,23	1888,54	2
3,1	3,29	1884,50	
2,9	3,18	1823,90	
2,9	3,215	1804,04	3
2,75	3,102	1773,05	
2,85	3,107	1834,57	
3	3,19	1880,88	4
2,9	3,162	1834,28	
2,75	3,063	1795,63	
2,8	3,132	1787,99	5
2,85	3,168	1799,24	
2,55	3,002	1698,87	
2,75	3,082	1784,56	6
2,75	3,09	1779,94	
2,5	3,007	1662,79	

Fonte: O Autor, 2014.

A Tabela 3 traz as médias das velocidades e os valores utilizados para os

cálculos, assim como os resultados.

Tabela 3 - Módulo de elasticidade dos corpos de prova e os valores utilizados para seu cálculo

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$V_L$ (m/s)	E (GPa)
1600	0,28	1827,03	4,18
1600	0,28	1865,65	4,36
1600	0,28	1803,89	4,07
1600	0,28	1836,93	4,22
1600	0,28	1762,03	3,89
1600	0,28	1742,43	3,8
1600	0,28	2009,16	5,05
1600	0,28	1988,92	4,95

Fonte: O Autor, 2014.

A Tabela 4 mostra as propriedades mecânicas do material compósito ensaiado segundo (ROHEM, 2010).

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do compósito ensaiado

$E_{\text{circunferencial}}$	17 Gpa
$E_{\text{axial}}$	9,5 Gpa
$\nu$	0,28
$\rho$	1,6 g/cm <sup>3</sup>
G	1,6 Gpa

Fonte: O Autor, 2014.

### 5.1.1.2 Concreto

Foram realizados também medições da velocidade do som no concreto a fim de validar a técnica para outro material heterogêneo e anisotrópico. Segundo LIN et. al. (2007), é possível estimar a resistência do concreto em função da velocidade do som no mesmo utilizando curvas de correlação da velocidade em função da quantidade de agregado graúdo existente no concreto.

Para o experimento, foram utilizados corpos de prova cilíndricos de concreto com aproximadamente 100 mm de diâmetro. O equipamento utilizado para

fazer as medições foi um PunditLab+, a frequência dos transdutores utilizados nos ensaios foi de 54 kHz e o método foi o da transmissão direta. A Figura 35 mostra o aparelho, os transdutores e a configuração utilizada nas medições.

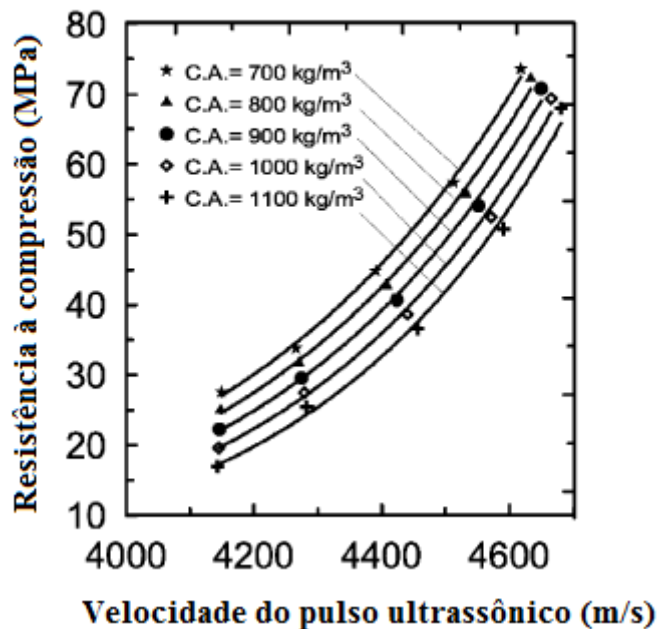
Figura 35 - Aparelho de ultrassom, transdutores e configuração de ensaio utilizados



Fonte: O Autor, 2014.

As amostras ensaiadas fazem parte do estudo realizado por PESSOA (2011), e pertencem a dois lotes, S20 e S30, que tiveram espécimes ensaiados por compressão, o que nos permite comparar os resultados do ensaio mecânico com os obtidos através do ultrassom. A Figura mostra as curvas de correlação da velocidade e resistência em função da quantidade de agregado graúdo (C.A.).

Figura 36 - Curva de correlação velocidade x resistência em função da quantidade de agregado graúdo



Fonte: LIN et. Al., 2007.

Para estimar a resistência à compressão precisamos então saber o traço de concreto utilizado para confeccionar as amostras ensaiadas para obtermos o valor do C.A., e calibrar o aparelho de ultrassom com a curva adequada. As tabelas 5 e 6 mostram o traço utilizado por PESSOA (2011) para os lotes S20 e S30 respectivamente.

Tabela 5 - Traço da série S20

Traço Utilizado na Série S20		Slump Obtido 11,0 cm
Material	Unidade	Quantidade p/ 1 m <sup>3</sup>
Cimento	kg	325,0
Brita 0	kg	83,0
Brita 1	kg	875,0
Areia	kg	735,0
Pó de Pedra	kg	200,0
Aditivo Plastek	l	1,6
Água	l	130,0
Relação Água/Cimento		0,40

Fonte: PESSÔA, 2011.

Tabela 6 - Traço da série S30

Traço Utilizado na Série S30		Slump Obtido	9,5 cm
Material	Unidade	Quantidade p/ 1 m <sup>3</sup>	
Cimento	kg	380,0	
Brita 0	kg	150,0	
Brita 1	kg	795,0	
Areia	kg	641,0	
Pó de Pedra	kg	210,0	
Aditivo Plastek	l	1,87	
Água	l	159,0	
Relação Água/Cimento		0,42	

Fonte: PESSÔA, 2011.

Com os valores de C.A. em torno de 950 kg/m<sup>3</sup> a curva escolhida para calibrar o aparelho foi a de 900 kg/m<sup>3</sup>. As Tabelas 7 e 8 apresentam os valores obtidos nas medições com o ultrassom, e a Tabela 9 mostra os resultados dos ensaios mecânicos obtidos por PESSOA (2011).

Tabela 7 - Valores obtidos nas medições com ultrassom para a série S20

Série S20						
ID	Velocidade [m/s]	Tempo [μs]	Distancia [m]	Resistência à Compressão [MPa]	Curva de Conversão	Frequência [kHz]
743	4279	22.9	0.098	30.3	FC 900	54
744	4323	22.9	0.099	33.5	FC 900	54
745	4323	22.9	0.099	33.5	FC 900	54
746	4375	22.4	0.098	37.6	FC 900	54
747	4367	22.9	0.100	36.9	FC 900	54

Fonte: O Autor, 2014.

Tabela 8 - Valores obtidos nas medições com ultrassom para a série S30

Série S30						
ID	Velocidade [m/s]	Tempo [μs]	Distancia [m]	Resistência à Compressão [MPa]	Curva de Conversão	Frequência [kHz]
748	4464	22.4	0.100	46.1	FC 900	54
749	4464	22.4	0.100	46.1	FC 900	54
750	4367	22.9	0.100	36.9	FC 900	54
751	4420	22.4	0.099	41.6	FC 900	54
752	4367	22.9	0.100	36.9	FC 900	54

Fonte: O Autor, 2014.

Tabela 9 - Valores obtidos no ensaio mecânico das amostras

Série	Identificação do CP	Tempo de cura ( dias)	Velocidade (MPa/seg)	Ensaio Realizado		Média
				Força (tf)	Tensão (MPa)	
S20	S20 – 8	28	0,4	24,97	31,8	31,0
	S20 – 9	28	0,6	23,92	30,5	
	S20 – 10	28	0,6	24,22	30,8	
S30	S30 – 8	28	0,6	27,39	34,9	39,3
	S30 – 9	28	0,5	31,95	40,7	
	S30 – 10	28	0,43	33,13	42,2	

Fonte: PESSÔA, 2011.

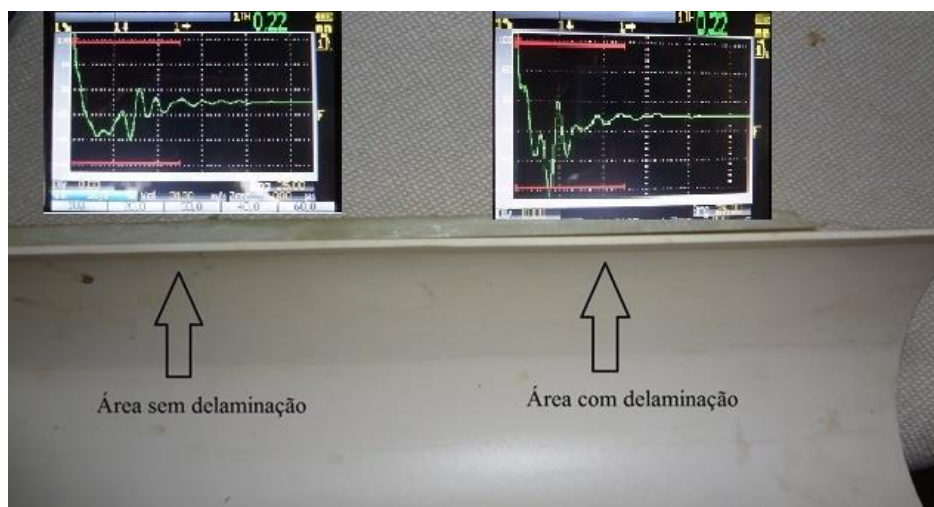
## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.1 Inspeção do compósito laminado

O experimento de medição e comparação da intensidade do pulso ultrassônico sobre áreas com e sem delaminação foi feito com a intenção de validar a técnica para então desenvolver a metodologia de inspeção. Na área íntegra o sinal deveria ser mais fraco, visto que a interface seria entre compósito e substrato, no caso PVC, e a transmissão seria de aproximadamente 99,95% de acordo com a Equação 5, enquanto que o sinal sobre a área delaminada deveria ser maior pois a interface seria entre o compósito e o ar, o que resultaria numa reflexão de quase 100% do pulso conforme a Equação 4.

Foi observada uma variação superior a 50% da amplitude, equivalente a uma queda de mais de 6dB no sinal se comparado o ponto com delaminação ao ponto cuja interface está íntegra. Esta variação da amplitude do sinal se mostrou grande o suficiente para que possa ser percebida por um inspetor treinado, o comprovou que o experimento foi bem sucedido em seu propósito. A Figura 37 mostra o comparativo dos sinais relativo aos pontos inspecionados.

Figura 37 - Comparação dos sinais na área sem delaminação e com delaminação

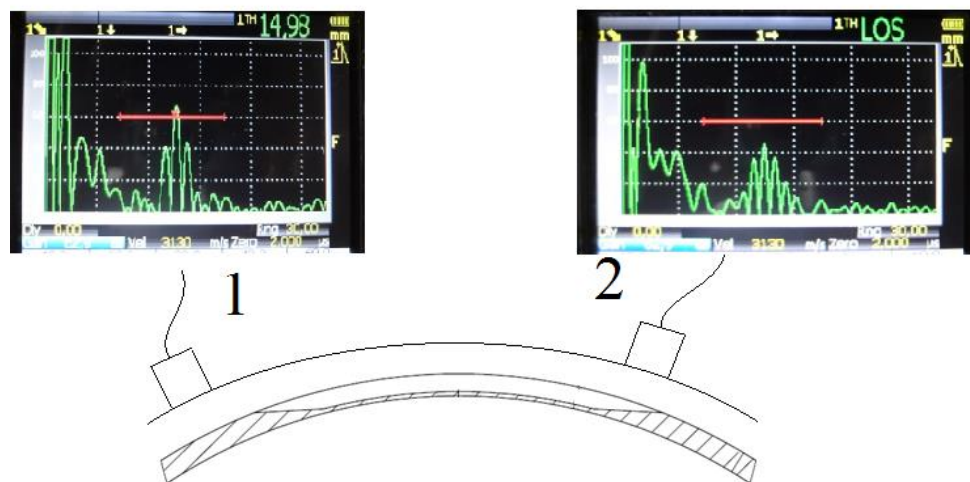


Fonte: O Autor, 2014.

Com a validação da técnica, a metodologia foi então desenvolvida e aplicada na prática. A inspeção dos corpos de prova se mostrou também positiva, pois as áreas com perda de espessura foram identificadas e delimitadas com sucesso.

A queda de sinal foi bastante acentuada, superior a 30%, ou 3,6 dB, sensível o suficiente para ser notada com clareza durante a inspeção.

Figura 38 – Sinal de ultrassom sobre área íntegra e área com perda de espessura



Fonte: O Autor, 2014.

Como as bordas a usinagem de redução de espessura dos corpos de prova foram feitas em ângulo, a queda de sinal foi bastante acentuada devido à refração dos pulsos ultrassônicos, retornando apenas uma parte do sinal ao transdutor. A geometria do defeito é atípica se comparada com o que ocorre em campo, entretanto, o importante é a variação na intensidade do pulso ultrassônico, e o sinal da área preenchida com o primer também foi menor do que o da área íntegra, o que permitiu a correta delimitação da área usinada.

Como os corpos de prova já haviam sido submetidos a um teste hidrostático destrutivo, e foram escolhidos os corpos de prova que falharam com indício de delaminação da camada adesivo/substrato, foi realizada também um inspeção na suposta área delaminada sem a perda de espessura. A técnica foi capaz de encontrar variações nas amplitudes do sinal de ultrassom que indicam a presença de delaminações de



pequenas dimensões, contudo, como o corpo de prova não foi confeccionado já com esta descontinuidade, não foi possível comparar as dimensões e a posição destas e, portanto confirmar sua presença.

## **6.2 Módulo de elasticidade do compósito laminado**

A abordagem utilizada se mostrou inadequada para caracterização do módulo de elasticidade do compósito laminado. Os resultados obtidos pelo método de ultrassom divergiram significativamente dos ensaios mecânicos.

Enquanto que para a medição de espessura deste tipo de material foi desconsiderada a anisotropia, o mesmo raciocínio não pôde ser considerado quanto ao módulo de elasticidade.

Segundo MOORE et. al.(2007), para sólidos isotrópicos elástico-lineares, os módulos longitudinais e de cisalhamento são suficientes para definir o comportamento elástico do material, enquanto que para determinar o módulo de um compósito laminado, no mínimo cinco módulos são necessários, podendo chegar a nove. Os resultados confirmaram isso, pois com o equipamento disponível só é possível medir a velocidade longitudinal e a transversal e, portanto é inviável determinar o módulo de elasticidade de compósitos laminados.

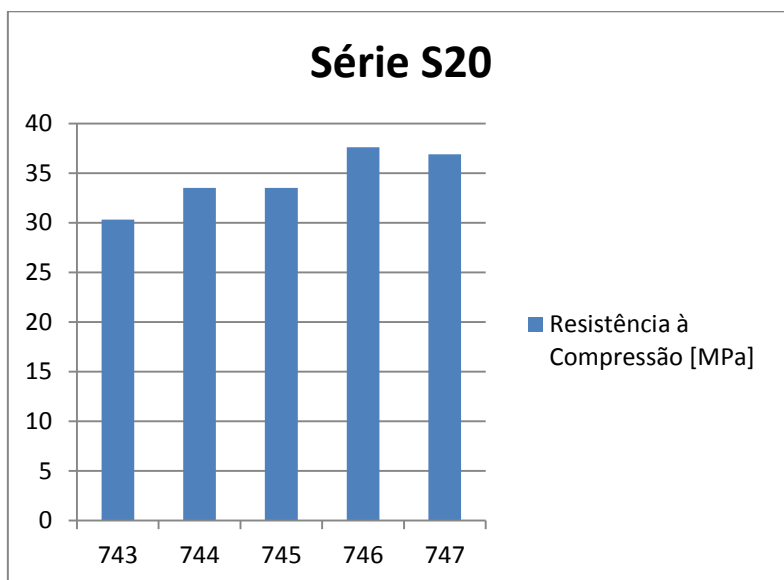
## **6.3 Módulo de elasticidade em concreto**

A técnica de transmissão direta é comumente utilizada para obtenção da resistência à compressão do concreto. A condição que permite a utilização do ultrassom para medir essa propriedade do material é que o concreto se comporta de maneira isotrópica quando submetido a esforços de compressão, condição não atendida nos compósitos laminados.

As médias dos ensaios por ultrassom ficaram bastante próximas das obtidas pelo ensaio mecânico. Como o método utilizado para obter os valores dos módulos se baseia em curvas que variam conforme a quantidade de agregado graúdo (C.A.), o

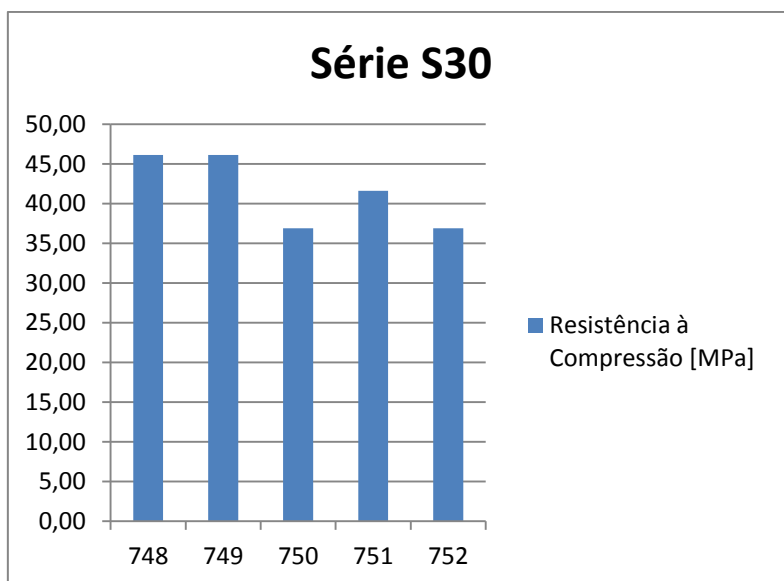
conhecimento do traço utilizado foi fundamental para uma correlação adequada. As Figuras 38 e 39 mostram os gráficos com os valores obtidos com ultrassom para as séries S20 e S30 respectivamente.

Figura 38 - Valores da resistência à compressão do concreto obtidos com o ultrassom para os corpos de prova da série S20



Fonte: O Autor, 2014.

Figura 39 - Valores da resistência à compressão do concreto obtidos com o ultrassom para os corpos de prova da série S30



Fonte: O Autor, 2014.

## CONCLUSÃO

Foi possível, a partir de uma extrapolação do comportamento do ultrassom observado em materiais homogêneos e isotrópicos, desenvolver uma metodologia capaz de detectar e dimensionar delaminações existentes no reparo laminado. A possibilidade de delimitar a área da descontinuidade assim como identificar a que profundidade ela se encontra permite uma avaliação bastante precisa da integridade estrutural do reparo. Este é um passo importante no sentido de aumentar a confiabilidade de um tipo de reparo comprovadamente seguro, eficaz e com custo relativamente baixo, mas ainda pouco difundido na indústria.

A tentativa de obtenção do módulo de elasticidade do compósito laminado com ultrassom gerou bons frutos quanto à compreensão do método e de características específicas do comportamento do material, e de suas aplicações e limitações.

Foi possível medir a velocidade do som nos corpos de prova de concreto, melhorando a compreensão da técnica e ampliando as possibilidades de pesquisas na área de inspeção. A comparação de um método não destrutivo a um destrutivo para a obtenção do módulo de elasticidade do concreto ampliou o conhecimento sobre a técnica e confirmou sua eficácia, com resultados bastante próximos.

## TRABALHOS FUTUROS

- Pesquisar e desenvolver corpos de prova que simulem defeitos reais e que permitam uma avaliação mais ampla das capacidades e limitações da técnica de inspeção desenvolvida.

- Combinar métodos de ensaios não destrutivos visando otimizar o tempo e a precisão dos ensaios em campo.

- Investigar mais a fundo as técnicas capazes de determinar o módulo de elasticidade de compósitos laminados de forma não destrutiva e desenvolver metodologias de aplicação destas técnicas em campo.

- Avaliar a eficácia do método de ultrassom para monitorar a qualidade do concreto ao longo do tempo.

## REFERÊNCIAS

ABNT. *NBR 8802 - Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica*, 1994.

ALMACO. Associação Latino Americana de Materiais Compósitos. Disponível em: <<http://www.almaco.org.br/imprensa.cfm>>. Acesso em: 05 jun.2014.

ANDREUCCI, Ricardo. *Ensaio por Ultrassom: aplicação industrial*. ABENDI, Ed.Jan./2011.

ASKLAND, Donald R. *Ciência e Engenharia dos Materiais*. Cengage Learning, 2008.

CORTINES, Vitor Joachim. *Desenvolvimento de ferramenta de inspeção por ultrassom para equipamento de reparo de dutos - Monografia (Graduação em Eng. Mecânica) – IPRJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro/Instituto Politécnico, Nova Friburgo, 2011.*

CALISTER, Jr. William D. *Material Science and Engineering: an Introduction – Jhon Wiley and Sons*, 2007.

DANTEC Dynamics. Site institucional da empresa. Disponível em <<http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-shearography>>. Acesso em: 03 jan. 2014.

DING, Wei. *Delamination Analysis of Composite Laminates*. Tese (Doutorado) – University of Toronto, 1999.

ENDTEC Treinamentos. Sítio institucional de empresa prestadora de serviços. Disponível em <<http://endtec.wordpress.com/author/endtec/>>. Acesso em: 03 fev. 2014.

FOG. Site com material didático sobre compósitos laminados. Disponível em: <[http://fog.ccsf.cc.ca.us/~wkaufmyn/ENGN45/Course%20Handouts/14\\_CompositeMaterials/03\\_Fiber-reinforcedComposites.html](http://fog.ccsf.cc.ca.us/~wkaufmyn/ENGN45/Course%20Handouts/14_CompositeMaterials/03_Fiber-reinforcedComposites.html)>. Acesso em: 03/06/2014.

HIBBELER, R. C. *Resistência do Materiais* Pearson Prentice Hall, 2004.

IAEA . *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures* International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002. p. 100-128.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. ISO/DTS 24817-06: Petroleum, petrochemical and natural gas industries – composite repairs for pipework – qualification and design, installation, testing and inspection. [Genève], 2006.

JR TECH. Site institucional da empresa. Disponível em: <<http://www.jrtech.co.uk/web/ndt-and-inspection/115-launch-of-new-woodpecker->

wp-632am>. Acessoem: 04 jun. 2014

KAPADIA, Ajay. *Non Destructive Testing of Composite Material* – National Composite Network, 2007.

LIN, Yiching. Investigation of Pulse Velocity-Strength Relationship of Hardened Concrete. *ACI Material Journal* V. 104, N. 4, 2007.

MINTON Coposite Inspection. Site institucional da empresa. Disponível em: <<http://www.mintoncompositeinspection.co.uk/>>. Acessoem: 03 jan. 2014.

MOORE, Patrick O, WORKMAN, Gary L., KISHONI, Doron. *Non Destructive Testing Handbook* vol.7 Ultrasonic Testing. 3ª.ed. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2007.

NDT.net. The open Access NDT Database. Disponível em <[www.ndt.net](http://www.ndt.net)>. Acesso em: 03 jan. 2014.

NI.com. *Fundamentals of Ultrasonic Imaging and Flaw Detection* – National Instruments. Disponível em <http://www.ni.com/white-paper/3368/en/>. Acesso em 03 jan. 2014.

OLYMPUS NDT. Site institucional do fabricante. Disponível em: <<http://www.olympus-ims.com/>>. Acesso em: 04 jan. 2014.

PESSÔA, José Renato de Castro. *Microtomografia com Raio X e processamento de imagem na obtenção da porosidade do concreto*. 2011. 129 f. Tese (Doutorado em Modelagem Computacional) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2011.

PETROBRAS S.A. *Apostila FRP - Montagem, inspeção e testes*. Petrobrás, 2011.

ROHEM, Ney Robson Ferreira. *Desenvolvimento de sistema de reparo para dutos e tubulações industriais utilizando materiais compósitos de matriz polimérica*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia do Materiais) IPRJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro/Instituto Politécnico, Nova Friburgo, 2010.

ROHEM, Ney Robson Ferreira. *Estudo para o desenvolvimento de reparos com materiais compósitos para dutos e implantação do laboratório de materiais compósitos*. Monografia (Graduação em Eng. Mecânica) – IPRJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro/Instituto Politécnico, Nova Friburgo, 2008.

SAMPAIO, E. M. *Um modelo de danos para juntas coladas*. 1998. Tese (Doutorado) COPPE-UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

SANTIN, Jorge Luiz. *Utra-som: técnica e aplicação*. 2ª.ed. Curitiba: Artes Gráficas e Editora Unificado, 2003;

TARGET Security. Site institucional da empresa. Disponível em: <[http://targetsecurity.co.nz/images/xray\\_images/img\\_8.jpg](http://targetsecurity.co.nz/images/xray_images/img_8.jpg)>. Acesso em: 04 jan.2014.