

DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA ULTRA-SÔNICA PARA MEDIDA DE  
POROSIDADE EM PASTILHAS DE UO<sub>2</sub>

Douglas Brandão Baroni

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA  
NUCLEAR DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR – ÊNFASE PROFISSIONAL EM  
ENGENHARIA DE REATORES.

Aprovada por:

---

Prof. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, D. Sc.  
(Orientador)

---

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D. Sc.  
(Orientador)

---

Prof. Maria da Conceição Barbosa Vieira Soares, Dra. Sc.  
(PPGIEN/CNEN)

---

Dr. Carlos Alfredo Lamy, D. Sc.  
(IEN/CNEN)

---

Prof. Maurício Saldanha Motta, D. Sc.  
(CEFET-RJ)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2008

BARO Baroni, Douglas Brandão.

**Desenvolvimento de técnica ultra-sônica para medida de porosidade em pastilhas de  $UO_2$**  / Douglas Brandão Baroni – Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2008. 97f.

Orientadores: *Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt e Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira*

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2008.

1. Técnicas não destrutivas. 2. Ultra-som. 3. Transformada de Fourier. 4. Redes Neurais Artificiais. 5. Porosidade. I. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Reatores. II Título.

CDD  
CDU

## DEDICATÓRIA

À Maria das Neves Cerqueira

Obrigado vó, por todo amor e carinho que nunca esquecerei.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meus pais e minhas irmãs por todo o carinho, apoio e amor presentes em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis. A Sueli Cerqueira e Celeste Cerqueira, por desde sempre e com carinho incomparável assumirem junto a meus pais a responsabilidade sobre meu futuro. A minha namorada Lailla Micas por todo Amor, compreensão e auxílio com o texto.

Aos amigos de turma Rafael Araújo, Altivo Monteiro, André Ferreira, Stefan Vajgel, Marco Aurélio e Carlos Alberto por toda a amizade, companheirismo e auxílio nos momentos de dificuldades durante as aulas. Ao amigo Anderson Johnson pela ótima qualidade das centenas de medidas realizadas. A todos os professores do Programa de Pós-graduação do Instituto de Engenharia Nuclear, por todos os ensinamentos e pela enorme dedicação.

Agradeço ao Professor da PUC Arthur Martins Barbosa Braga, e ao Professor da COPPE/UFRJ João Marcos Alcoforado Rebello pelo empréstimo do equipamento de ultra-som, a Elizabeth Eugênio de Mello Oliveira por seu cuidado e organização inigualáveis, os quais permitiram que tivéssemos corpos de prova e informações fundamentais a realização deste trabalho. A Daniel Martorelli e Carlos Santana Farias pelo fundamental apoio com os aparelhos.

A Irene Calvalcante e Joana Azambuja, por toda atenção e gentileza com que me auxiliaram nos mais diversos momentos ao longo desse período de pesquisas.

A Carlos Alfredo Lamy por acompanhar de perto o andamento deste trabalho com sugestões e explicações essenciais, e que junto a Maria da Conceição Barbosa Vieira Soares e Maurício Saldanha Motta aceitaram gentilmente a missão de avaliar este trabalho no curtíssimo intervalo de tempo que lhes foi proposto.

Agradeço a Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt e Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, pela dedicada orientação, suporte e principalmente pela confiança depositada, o que me motivou a superar todas as dificuldades, e agradeço também por todas as conversas, conselhos e orientações, o que os tornaram mais que orientadores e tenho certeza que hoje posso chamá-los de amigos.

Minha profunda gratidão a todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

*Se vi mais longe,  
foi porque estava sobre os ombros de gigantes.*

(Isaac Newton)

Resumo da Dissertação apresentada ao IEN/CNEN como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA ULTRA-SÔNICA PARA MEDIDA DE POROSIDADE EM PASTILHAS DE $UO_2$

Douglas Brandão Baroni

Maio/2008

Orientadores: Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt

Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira

Programa: Engenharia Nuclear

A caracterização do combustível nuclear é de grande importância para garantir a eficiência e até mesmo a segurança nas usinas. Atualmente as técnicas utilizadas envolvem elevados custos com equipamentos, materiais e instalações de proteção radiológica, além disso, por serem destrutivas, impõem que a verificação das características deste material seja feita por amostragem. Neste trabalho desenvolveu-se uma técnica não destrutiva, que foi utilizada para medidas de porosidade em pastilhas de Alumina ( $Al_2O_3$ ) que forneceu resultados precisos e rápidos. Tem-se o objetivo de que esta técnica possa ser utilizada na prática laboratorial para medidas em pastilhas de  $UO_2$ , pois viabilizaria a inspeção de até 100% do combustível nuclear, garantindo maior controle das características do material utilizado, resultando em maior segurança, eficiência e economia. A inovação da técnica se deve ao fato de analisar o espectro de frequência do pulso ultra-sônico, e não seu tempo de percurso no material, comumente utilizado. Neste trabalho foram utilizadas 40 pastilhas cerâmicas de alumina com valores de porosidade entre 5,09% e 37,30%. Um sistema de reconhecimento de sinais utilizando redes neurais artificiais possibilitou distinguir pastilhas com diferenças de porosidade de 0,04%. Observou-se também que esta técnica pode ser utilizada para diversos outros fins, como por exemplo, na determinação da fração de vazio em regime de escoamento bifásico, que é muito importante para garantir a eficiência e segurança de reatores nucleares.

Abstract of Dissertation presented to IEN/CNEN as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DEVELOPMENT OF ULTRASSONIC TECHNIQUE FOR MENSUARE OF  
POROSITY OF  $UO_2$  PELLETS

Douglas Brandão Baroni

May/2008

Advisors: Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt

Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira

Program: Nuclear Engineering

The characterization of nuclear fuel is of great importance to guarantee the efficiency and even the safety in the power stations. At present, the techniques used implicate elevated costs with equipments, materials and installations of radiological protection. Besides, because of being destructive techniques, they impose that the checking of the characteristics of this material is done by sampling. In this work a not destructive technique was developed for measures of porosity in ceramic materials with efficiency and precision. The objective of this work is to this technique will be able to be used in practice laboratorial for measures in  $UO_2$  pellets, so it would become viable the inspection of up to 100% of the nuclear fuel, guaranteeing bigger control of the characteristics of the used material, turning in increasing safety, efficiency and economy. The innovation of the technique is due to the fact of analysing the specter of frequency of the ultrasonic wrist, and not his time of course in the material, frequently used. In this work 40 ceramic pellets of alumina were used with values of porosity between 5,09% and 37,30%. A system of recognition of signs using artificial neural networks made possible to distinguish pellets with differences of porosity of 0,04%. It was observed that this technique can be used for several others aims, for example, in the determination of the void fraction in regimen of two-phase flow, what is very important to guarantee the efficiency and safety of nuclear reactors.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xii
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2 – OBJETIVOS DA PESQUISA .....	2
1.3 – ESCOPO DA PESQUISA .....	3
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
2.1 – A FÍSICA DO ULTRA-SOM .....	5
<b>2.1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS</b> .....	5
<b>2.1.2 – FREQUÊNCIA, VELOCIDADE E COMPRIMENTO DE ONDA</b> .....	5
<b>2.1.3 – REFLEXÃO E REFRAÇÃO</b> .....	7
<b>2.1.4 – RESSONÂNCIA</b> .....	9
<b>2.1.5 – DIFRAÇÃO</b> .....	10
<b>2.1.6 – INTERFERÊNCIA</b> .....	11
<b>2.1.7 – ATENUAÇÃO</b> .....	13
2.1.7.1 – ESPALHAMENTO .....	13
2.1.7.2 – ABSORÇÃO .....	14
2.1.7.3 – DIVERGÊNCIA DO FEIXE .....	15
2.1.7.4 – IMPEDÂNCIA ACÚSTICA .....	16
<b>2.1.8 – DISPERSÃO</b> .....	17
<b>2.1.9 – TIPOS DE ONDA</b> .....	20
2.1.9.1 – ONDAS LONGITUDINAIS .....	21
2.1.9.2 – ONDAS TRANSVERSAIS .....	22
2.1.9.3 – ONDAS SUPERFICIAIS E SUBSUPERFICIAIS .....	24
a) Ondas de Rayleigh .....	24
b) Ondas Love .....	25
c) Ondas Creeping .....	26
d) Ondas Lamb .....	27
e) Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (LCR) .....	28
<b>2.2.10 – EFEITO PIEZOELÉTRICO E EFEITO LIPPMANN</b> .....	29



2.2 – TRANSDUTORES .....	30
<b>2.2.1 – ACOPLANTES</b> .....	31
<b>2.2.2 – MÉTODO DE UTILIZAÇÃO DE TRANSDUTORES</b> .....	31
2.2.2.1 – TRANSMISSÃO .....	31
2.2.2.2 – PULSO-ECO .....	32
2.3 – REDES NEURAIS ARTIFICIAIS .....	33
<b>2.3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....	33
<b>2.3.2 – CLASSIFICAÇÃO DAS REDES</b> .....	36
<b>2.3.3 – REDE GRNN</b> .....	36
2.4 – A TRANSFORMADA DE FOURIER .....	39
<b>2.4.1 – TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER</b> .....	40
<b>2.4.2 – TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER</b> .....	41
<b>CAPÍTULO 3 – A TÉCNICA PROPOSTA</b> .....	44
3.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	44
3.2 – OUTRAS TÉCNICAS DE MEDIDA POR ULTRA-SOM .....	44
3.3 – A TÉCNICA DESENVOLVIDA .....	46
<b>CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	49
4.1 – PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	49
4.2 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	50
4.3 – METODOLOGIA .....	56
<b>4.3.1 – METODOLOGIA DE MEDIDAS</b> .....	56
<b>4.3.2 – METODOLOGIA DE ANÁLISE</b> .....	57
<b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	65
5.1 – RESULTADOS OBTIDOS .....	65
5.2 – ANÁLISE DA TÉCNICA .....	68
<b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES</b> .....	76
<b>SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</b> .....	77
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	82

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> – Divisão em faixas de frequência das ondas mecânicas.....	6
<b>Figura 2.2</b> – Onda incidente, onda refletida e onda refratada (transmitida) .....	7
<b>Figura 2.3</b> – Reflexão difusa devido a rugosidade da superfície refletora.....	9
<b>Figura 2.4</b> – Partícula vibrando em ressonância com fonte externa.....	9
<b>Figura 2.5</b> – Difração de ondas por uma abertura .....	10
<b>Figura 2.6</b> – Difração de ondas por um obstáculo .....	10
<b>Figura 2.7</b> – Esquema de interferência construtiva entre duas ondas de fontes coerentes .....	11
<b>Figura 2.8</b> – Aniquilação de ondas através da interferência destrutiva de fontes em oposição de fase.....	12
<b>Figura 2.9</b> – Padrão de interferência entre duas ondas planas .....	12
<b>Figura 2.10</b> – Esquema mostrando a divergência do feixe ultra-sônico .....	15
<b>Figura 2.11</b> – Variação da intensidade do pulso refletido por um anteparo em função da divergência do feixe (Andreucci, 2002).....	16
<b>Figura 2.12</b> – Combinação de ondas (Halliday, 2004).....	18
<b>Figura 2.13</b> – Em um meio dispersivo, as formas de onda se modificam durante sua propagação (Halliday, 2004) .....	19
<b>Figura 2.14</b> – Formação do pulso pela superposição de formas de onda contínuas (Bray D. E.; Stanley R. K., Nondestructive evaluation, 1997).....	19
<b>Figura 2.15</b> – Propagação das ondas longitudinais .....	21
<b>Figura 2.16</b> – Propagação das ondas transversais.....	23
<b>Figura 2.17</b> – Movimento que ocorre na propagação das ondas de Rayleigh (Matarezi, 2001).....	24
<b>Figura 2.18</b> – Propagação das ondas de Rayleigh .....	25
<b>Figura 2.19</b> – Propagação das ondas de Love (Matarezi, 2001) .....	26
<b>Figura 2.20</b> – Propagação das Ondas Creeping (adaptado de Santin, 1993).....	26
<b>Figura 2.21</b> – Propagação das ondas Lamb .....	27
<b>Figura 2.22</b> – Distribuição do campo de pressão das ondas LCR (Ortega, 2001) ...	28
<b>Figura 2.23</b> – Exemplo de esquema de um transdutor do tipo SE acoplado a uma superfície .....	30

<b>Figura 2.24</b> – Exemplo de esquema de transdutores sendo utilizados no modo transmissão .....	32
<b>Figura 2.25</b> – Esquema de transdutor sendo utilizado no modo pulso-eco.....	32
<b>Figura 2.26</b> – Esquema mostrando um neurônio e seus constituintes .....	33
<b>Figura 2.27</b> – Esquema de um neurônio artificial (adaptado de Lippman, 1987) .....	34
<b>Figura 2.28</b> – Arquitetura da rede neural do tipo GRNN (Morais D. R., Rolim J. G., 2004).....	37
<b>Figura 2.29</b> – Forma de onda triangular representada no domínio do tempo e no domínio da frequência (Transformada).....	40
<b>Figura 2.30</b> – Gráfico mostrando a transformada de Fourier e uma possível discretização deste sinal (DFT).....	41
<b>Figura 2.31</b> – Esquema de equalizador usado em aparelhos de som convencionais; exemplo de aplicação da Transformada Rápida de Fourier .....	43
<b>Figura 3.1</b> – Pulso ultra-sônico fortemente atenuado devido à alta porosidade.....	45
<b>Figura 3.2</b> – Ecos sobrepostos. Medidas feitas em uma pastilha de 5mm de espessura .....	45
<b>Figura 3.3</b> – Espectro de frequência do pulso ultra-sônico de um transdutor de 5MHZ, antes (em azul) e depois de atravessar uma pastilha de 28,70% de porosidade (em vermelho).....	46
<b>Figura 3.4</b> – Exemplo de sinais característicos de uma pastilha de porosidade de 10,90% no domínio da frequência (a) e no domínio do tempo (b).....	47
<b>Figura 3.5</b> – Em (a) tem-se um sinal característico das pastilhas de porosidade 37,30% e em (b) o sinal característico das pastilhas de porosidade 28,70%, que podem facilmente ser identificados .....	48
<b>Figura 3.6</b> – Em (a) tem-se um sinal característico das pastilhas de porosidade 6,54% e em (b) o sinal característico das pastilhas de porosidade 6,50%, difíceis de serem distinguidos visualmente .....	49
<b>Figura 4.1</b> – Foto de algumas das pastilhas utilizadas no trabalho .....	51
<b>Figura 4.2</b> – Esquema de montagem dos equipamentos utilizados .....	52
<b>Figura 4.3</b> – Visão geral dos equipamentos utilizados.....	52
<b>Figura 4.4</b> – Equipamento Explorer II da MATEC Instruments .....	53
<b>Figura 4.5</b> – Foto da placa geradora de sinal ultra-sônico TB1000 .....	54
<b>Figura 4.6</b> – Foto da placa de aquisição de sinal ultra-sônico STR8100.....	54
<b>Figura 4.7</b> – Foto do computador utilizado para análise de sinais.....	55

<b>Figura 4.8</b> – Transdutor Panametrics sendo acoplado a uma das pastilhas durante o processo de medidas. ....	56
<b>Figura 4.9</b> – Curva de freqüência do transdutor utilizado neste trabalho, gerada pelo software MUIS32 .....	56
<b>Figura 4.10</b> – Arquivo gerado pelo MUIS32 aberto em um software de edição de texto .....	57
<b>Figura 4.11</b> – Pontos discretos no espectro de freqüência da pastilha BB2 (Porosidade igual a 28,70%) .....	58
<b>Figura 4.12</b> – Em amarelo as faixas do espectro de freqüência que foram excluídas.....	59
<b>Figura 4.13</b> – Cinco primeiros sinais referentes a pastilha BB2 (Porosidade igual a 28,70%) .....	60
<b>Figura 4.14</b> – Média dos cinco primeiros sinais referentes a pastilha BB2 (Porosidade igual a 28,70%) .....	61
<b>Figura 4.15</b> – Todas as médias de sinais que caracterizam a pastilha BE3 .....	62
<b>Figura 4.16</b> – Espectro mais bem definido após a retirada da média 1.....	62
<b>Figura 4.17</b> – Estrutura do arquivo utilizado para treinamento da rede.....	63
<b>Figura 4.18</b> – Esquema da estrutura da rede com valores de entrada e saída referentes a uma pastilha de porosidade igual a 19,30%.....	64
<b>Figura 5.1</b> – Formas diferentes do espectro de freqüência para pastilhas que apresentam a mesma porosidade.....	75
<b>Figura 6.1</b> – Esquema para medidas em escoamento bifásico em (a) e corte na seção transversal ao tubo em (b).....	79
<b>Figura 6.2</b> – Micrografia da seção transversal da membrana de filtração obtida em microscópio eletrônico de varredura .....	80
<b>Figura 6.3</b> – Esquema mostrando transdutor de imersão sendo utilizado no modo pulso/eco para análise superficial da membrana.....	81
<b>Figura 6.4</b> – Dois transdutores no esquema de análise no modo de transmissão... ..	81
<b>Figura 6.5</b> – Esquema de tubo com áreas em corrosão .....	82
<b>Figura 6.6</b> – Nesta aplicação, um transdutor de ondas transversais é mais adequado, para que não haja interação do pulso ultra-sônico com o fluido no interior do tubo.....	82

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – Impedância acústica de alguns materiais (Gomez F. R., 1980).....	17
<b>Tabela 2.2</b> – velocidade da onda longitudinal para diversos meios (Gomez F. R., 1980).....	22
<b>Tabela 2.3</b> – velocidade da onda transversal para diversos meios (Gomez F. R., 1980).....	23
<b>Tabela 2.4</b> – Vantagens do uso do algoritmo da FFT em relação ao cálculo da DFT diretamente pela definição .....	42
<b>Tabela 4.1</b> – Valores de porosidade de cada pastilha produzida, em função da pressão e temperatura de sinterização. Pode-se notar ligeira variação de porosidade para pastilhas produzidas com mesma pressão e temperatura de sinterização.....	50
<b>Tabela 5.1</b> – Resumo dos resultados do primeiro treinamento.....	66
<b>Tabela 5.2</b> – Resultado do primeiro treinamento (apenas os resultados com erro diferente de zero).....	67
<b>Tabela 5.3</b> – Resumo dos resultados do segundo treinamento .....	68

## Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O dióxido de Urânio ( $UO_2$ ) é amplamente utilizado como combustível nuclear em reatores do tipo PWR (Pressurized Water Reactor), como é o caso de Angra I e II. Ao se fazer uma análise térmica das pastilhas combustíveis de  $UO_2$ , notam-se diversos fatores que influenciam em sua condutividade térmica, dos quais os mais importantes são: a temperatura, porosidade, razão atômica Oxigênio/Urânio, conteúdo de Dióxido de Plutônio ( $PUO_2$ ), grau de rachadura nas pastilhas e a taxa de queima (burnup).

Em geral, as pastilhas de combustível nuclear são cerâmicas, fabricadas através da sinterização de pó de  $UO_2$  prensado, ou um óxido misto, a altas temperaturas, na qual controlando as condições de sinterização pode-se produzir pastilhas com o valor de porosidade desejado, o que geralmente é em torno de 10% de porosidade.

Geralmente a condutividade térmica de um sólido diminui com o aumento da presença de poros em sua estrutura. Desta forma, uma baixa porosidade é desejada para maximizar a condutividade, melhorando o fluxo de calor nas pastilhas.

Porém, os produtos de fissão gasosos originados nas pastilhas durante as reações nucleares resultam em pressões internas, podendo ocasionar fissuras e deformações nas pastilhas. Assim, um certo grau de porosidade é desejado para acomodar os gases da fissão, limitando uma possível deformação do combustível por inchamento ou por fissuras, o que pode levar até mesmo a uma parada no funcionamento da usina. Nota-se com isto que dentre os fatores já citados, a porosidade pode ser considerada um dos mais importantes, pois além de estar diretamente ligada a condutividade térmica, pode ser uma das causas de rachaduras nas pastilhas, que é outro fator determinante para a condutividade térmica, além de estar relacionada a integridade estrutural do combustível.

Assim, o grau de porosidade do combustível deve ser muito bem controlado para o perfeito funcionamento e eficiência dos reatores, principalmente em reatores rápidos (breeders), onde a potência específica é alta, o que torna a taxa de produção de gases de fissão por unidade de volume de combustível ainda maior.

## **1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

O Laboratório de Ultra-som do Instituto de Engenharia Nuclear (LABUS/IEN) tem desenvolvido diversos trabalhos utilizando técnicas ultra-sônicas não convencionais aplicadas a caracterização de materiais e na avaliação de escoamento de fluidos, possuindo um grupo de pesquisa com a linha “Avaliação por ultra-som de partículas dispersas em uma matriz”. Este trabalho é continuidade desta linha de pesquisa, onde desenvolveu-se uma técnica ultra-sônica que através de análises utilizando redes neurais artificiais permitiu medir porosidades em corpos de prova cerâmicos de maneira rápida, precisa e não destrutiva. A inovação desta técnica está em analisar o pulso ultra-sônico no domínio da frequência ao invés do domínio do tempo, comumente utilizado.

Quando observado no domínio da frequência, o pulso ultra-sônico fornece informações sobre a estrutura do material em que se propaga, pois ao atravessá-lo, o sinal é deformado de maneira única para cada tipo de estrutura interna. Desta forma, o espectro de frequência do pulso ultra-sônico de retorno fornece informações que podem ser utilizadas para caracterizar a pastilha analisada, funcionando como sua “impressão digital ultra-sônica”.

Com isto pretende-se desenvolver uma técnica que possa vir a ser utilizada para medida de porosidade em pastilhas de  $UO_2$ , porém em função de todas as dificuldades e riscos envolvidos na obtenção e manuseio das pastilhas de dióxido de Urânio, os corpos de prova utilizados neste estudo inicial serão pastilhas de Alumina ( $Al_2O_3$ ), que além de serem também cerâmicas, possuem porosidades que variam de 5,09% a 37,30%, cobrindo a faixa de porosidade encontrada nas pastilha de  $UO_2$  que é em torno de 10%. Pastilhas de Alumina são também muito empregadas na indústria nuclear como isoladores térmicos, colocadas no início e no fim das varetas dos elementos combustíveis para evitar um contato direto das pastilhas de  $UO_2$  (onde o calor é gerado) com as varetas.

Assim, as pastilhas utilizadas neste trabalho possuem natureza (cerâmica) e característica (porosidade) semelhantes às pastilhas de  $UO_2$ , com isto acredita-se que a técnica desenvolvida não necessite de grandes alterações ou ajustes para ser utilizada em pastilhas de  $UO_2$ .

Foram feitas então diversas medidas do sinal ultra-sônico em função da frequência para um grupo de 40 pastilhas cerâmicas de alumina, com porosidades

medidas previamente pela técnica de Arquimedes, criando padrões de sinais característicos para cada pastilha.

Com a porosidade das pastilhas de Alumina previamente definidas e de posse dos sinais de cada pastilha que caracterizam uma porosidade, criou-se uma associação entre o sinal observado em cada pastilha e sua respectiva porosidade. Para pastilhas com porosidades de valores distintos, os padrões de sinais possuem características bem definidas e diferentes entre si, podendo ser visualmente caracterizados. Porém para pastilhas com pequenas variações de porosidade, as deformações nos sinais tornam-se mínimas, não sendo visualmente detectadas. Desta forma, optou-se por utilizar um sistema de reconhecimento de sinais baseado em inteligência artificial. Com os sinais de cada pastilha e seus respectivos valores de porosidade, criou-se um banco de dados que foi utilizado para treinar uma rede neural artificial do tipo *General Regression Neural Network* (GRNN). Esta rede consegue assimilar informações e posteriormente pode identificar padrões em sinais ultra-sônicos e associá-los a um valor de porosidade de acordo com o que foi treinada.

Com isto, desenvolveu-se uma técnica que permite melhorar todo o processo de caracterização de pastilhas combustíveis, resultando em um salto tecnológico se comparada às técnicas usuais, que envolvem elevados custos com equipamentos, materiais e instalações de proteção radiológica, e ainda assim não asseguram que individualmente as pastilhas estejam em acordo com as características fornecidas, pois por serem técnicas destrutivas o controle é feito por amostragem.

A técnica proposta viabilizaria a inspeção de até 100% do combustível nuclear, podendo assegurar as características individuais das pastilhas utilizadas. Por ser uma técnica ultra-sônica, não requer elevados gastos com equipamentos, pode ser facilmente implementada e não envolve nenhum risco radiológico, pois preserva a integridade do material analisado, não necessitando de instalações especiais.

Outro aspecto importante que torna esta técnica ainda mais versátil é a possibilidade de ser adequada também para a verificação da integridade das pastilhas de  $UO_2$  no que diz respeito a possíveis defeitos e irregularidades (trincas, vazios, não homogeneidade da porosidade etc) que as tornem inadequadas para o uso, garantindo assim maior segurança na utilização deste material.



Tem-se o objetivo de que assim que comprovado os resultados destes experimentos realizando-se medidas diretas em pastilhas de  $UO_2$ , esta técnica seja utilizada nos procedimentos laboratoriais para medida e controle de porosidade das pastilhas de combustível nuclear.

### **1.3 ESCOPO DA PESQUISA**

A dissertação é composta de 8 capítulos, na qual este inicialmente apresenta a introdução ao tema e os objetivos da pesquisa realizada.

O capítulo 2 faz uma revisão sobre a teoria e conceitos envolvidos, fazendo uma breve introdução aos principais fenômenos que possibilitam e justificam o funcionamento da técnica desenvolvida. Trata-se também sobre o funcionamento e utilização de redes neurais artificiais no reconhecimento de padrões, neste caso, sinais ultra-sônicos. Faz-se também uma breve abordagem sobre a Transformada de Fourier.

O capítulo 3 trata do desenvolvimento da técnica proposta, mostrando suas vantagens em relação às outras técnicas, traçando paralelos inclusive com outra técnica ultra-sônica.

O capítulo 4 trata do procedimento experimental, desde a preparação dos corpos de prova, passando pelos equipamentos utilizados até a metodologia de medida adotada para se fazer a aquisição de dados.

O capítulo 5 mostra os resultados obtidos, algumas discussões e uma análise sobre aspectos importantes da técnica proposta.

No capítulo 6 encerra-se o trabalho com a apresentação das principais conclusões. Devido às potencialidades da técnica, propõem-se algumas recomendações para pesquisas futuras, onde também são apresentadas possíveis aplicações desta técnica.

## **Capítulo 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 – A FÍSICA DO ULTRA-SOM**

Esta seção abordará os fenômenos básicos envolvidos no ultra-som, mostrando os princípios físicos essenciais e alguns conceitos fundamentais para a compreensão da interação da onda ultra-sônica com o material estudado, fornecendo a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da técnica proposta neste trabalho.

#### **2.1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS**

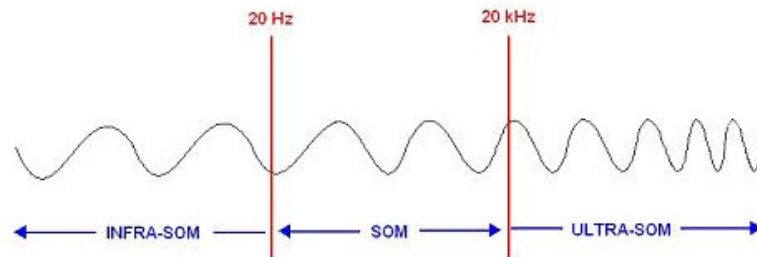
Inspeções em materiais utilizando técnicas ultra-sônicas são feitas através da análise de ondas transmitidas no material em que se faz a inspeção. As ondas ultra-sônicas são ondas mecânicas, ou seja, são compostas por pequenas oscilações (vibrações) das partículas que compõem o meio em que se propaga, assim, a passagem de energia acústica no meio faz com que as partículas que compõem o mesmo, execute um movimento de oscilação em torno da posição de equilíbrio.

#### **2.1.2 – FREQUÊNCIA, VELOCIDADE E COMPRIMENTO DE ONDA**

O ar, ou outro meio na trajetória de uma onda sonora torna-se alternadamente mais denso ou mais rarefeito. As variações na pressão fazem com que os tímpanos dos nossos ouvidos vibrem com a mesma frequência (ver seção 2.1.4 – *RESSONÂNCIA*) da onda, o que produz a sensação fisiológica do som. A maioria dos sons é produzida por objetos que estão vibrando, pois vibrações periódicas enviam para o meio sucessivas camadas de compressão e rarefação. A distância entre duas regiões de compressão (ou expansão) consecutivas é chamada de *comprimento de onda*.

Um ouvido normal é sensível a ondas sonoras com frequências entre aproximadamente 20Hz e 20.000Hz. Quando a frequência é menor que 20 Hz as

ondas são chamadas de infra-sons, e quando a frequência é maior que 20.000Hz, são chamadas de ultra-sons, como mostra a Figura 2.1.



**Figura 2.1: Divisão em faixas de frequência das ondas mecânicas.**

*Frequência* é o número de oscilações realizadas por unidade de tempo, e é expressa no Sistema Internacional de Medidas (SI) utilizando Hertz (Hz) como unidade de medida. A *velocidade* das ondas é uma característica do meio em que se propaga. Por exemplo, o som tem uma velocidade de aproximadamente 330m/s no ar, 1500m/s na água e 5900m/s no aço. A frequência ( $f$ ), velocidade ( $V$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) estão relacionados através da seguinte equação:

$$V = \lambda f \quad (1)$$

Ao utilizarmos técnicas ultra-sônicas, a frequência utilizada durante as inspeções deve estar adequada à aplicação, pois para a detecção de discontinuidades, geralmente são usadas frequências entre 2,25 e 10MHz. Frequências maiores que 10MHz, permitem maior sensibilidade para a detecção de pequenas discontinuidades, porém apresentam baixo poder de penetração, pois (ver seção 2.1.7 – ATENUAÇÃO) frequências altas são afetadas pela própria estrutura metalúrgica do material, ou seja, a granulação, compostos intermetálicos, precipitados ou qualquer outra característica proveniente do processo de fabricação. Assim, para a determinação de tamanhos de grãos e poros, o pulso ultra-sônico só se torna sensível a estas estruturas quando o tamanho do comprimento de onda é tal que possa interagir com que as dimensões das estruturas a serem determinadas (poros, grãos etc). Isto torna o tamanho da discontinuidade ou defeito a ser detectado, a primeira consideração a ser feita quando seleciona-se a frequência de ensaio.

### 2.1.3 – REFLEXÃO E REFRAÇÃO

Quando uma onda incide sobre a interface que separa dois meios, podem ocorrer dois fenômenos distintos: reflexão e refração.

A reflexão é a tendência de uma onda voltar para o meio de origem quando incide sobre a superfície de separação entre dois meios com propriedades distintas. A reflexão do som ocorre quando há diferença de impedância acústica (ver seção 2.1.7.4 – *IMPEDÂNCIA ACÚSTICA*) entre dois meios. Quanto maior a diferença de impedância acústica, maior é a reflexão do feixe sonoro e menor a transmissão do som de um meio para o outro. Por exemplo, a diferença de impedância entre a base acrílica do transdutor e os metais, torna necessária a utilização de um gel para acoplamento acústico (ver seção 2.2.2 – *ACOPLANTES*), utilizado para melhorar a transmissão da onda ultra-sônica para o metal, caso contrário o feixe seria refletido por causa da interface acrílico/ar.

Assim, parte da onda volta e se propaga no mesmo meio no qual a onda incide (reflexão da onda). Outra parte da onda passa de um meio para o outro propagando-se neste segundo meio, como mostra a figura 2.2.

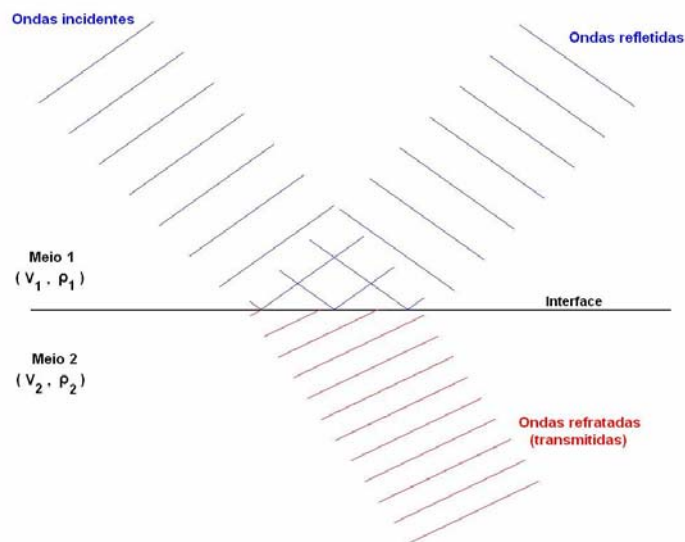


Figura 2.2: Onda incidente, onda refletida e onda refratada (transmitida).

A esse último fenômeno no qual a onda passa de um meio para o outro, damos o nome de refração, e ocorre quando a onda passa de um meio para outro na qual é transmitida em condições diferentes de velocidade e comprimento de onda, mantendo sua frequência constante.

Na figura 2.2 as características acústicas do meio 1 são  $\rho_1$  e  $v_1$ , onde  $\rho_1$  é a densidade do meio 1 e  $v_1$  a velocidade da onda neste meio; de modo análogo, as características do meio 2 são  $\rho_2$  e  $v_2$ . Considerando as características acústicas dos dois meios, algumas relações matemáticas podem ser obtidas entre as amplitudes das ondas refletidas e transmitidas, e a amplitude da onda incidente. Considerando “A” como amplitude da onda incidente, “B” como amplitude da onda refletida e “C” como amplitude da onda transmitida (refratada), as amplitudes “B” e “C” podem ser escritas em função de “A” (Matarezi, 2001):

$$B = \frac{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \times A \quad (2)$$

$$C = \frac{2\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \times A \quad (3)$$

A reflexão e a refração ocorrem concomitantemente, podendo haver predominância de um fenômeno sobre o outro, em função das características dos meios em que são transmitidas as ondas.

Se a superfície de separação entre os dois meios for plana (por exemplo, superfície de um metal) e polida (uma superfície regular) então uma onda incidente será refletida mantendo seu aspecto (Figura 2.2) . A esta reflexão dá-se o nome de reflexão regular. Se a superfície de separação apresentar rugosidades a reflexão será difusa (Figura 2.3), dissipando o feixe incidente em direções diferentes.



Figura 2.3: Reflexão difusa devido a rugosidade da superfície refletora.

### 2.1.4 – RESSONÂNCIA

Ressonância é o fenômeno pelo qual um corpo vibra ao ser atingido por vibrações produzidas por um outro corpo quando a frequência das vibrações do primeiro coincide com sua *frequência natural*\* (Figura 2.4). Como resultado, a amplitude de oscilação do corpo em ressonância atinge valores elevados, pois a fonte progressivamente cede energia ao corpo.

Aplicando-se uma vibração ultra-sônica num corpo a ser ensaiado, dependendo das características acústicas desse corpo, ele entrará em ressonância na medida em que o período da vibração aplicada se aproxime do seu período natural de vibração.

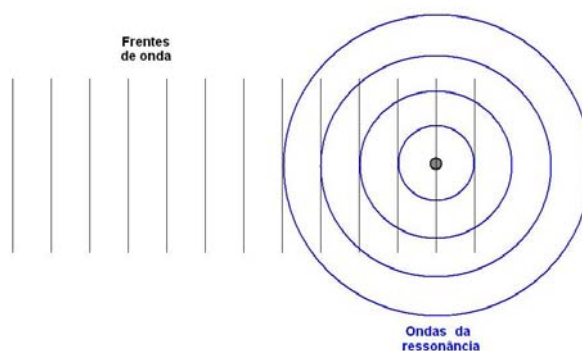


Figura 2.4: Partícula vibrando em ressonância com fonte externa

\* A frequência natural de oscilação depende de características do corpo, como massa, dimensões etc. Esta é a frequência com que cada corpo tende a vibrar com maior facilidade, oferecendo a menor resistência possível a oscilação.

## 2.1.5 – DIFRAÇÃO

A difração é um fenômeno que pode ocorrer em função da interação do feixe sonoro com estruturas que possuem dimensões da ordem do comprimento de onda da onda utilizada. A difração ocorre quando, ao passar por uma abertura, as ondas se propagam em todas as direções na forma de ondas esféricas a partir desta abertura (Figura 2.5), e corresponde à possibilidade de uma onda contornar um obstáculo, penetrando na região de sombra do mesmo (Figura 2.6).

A difração é explicada pelo *Princípio de Huygens*\*: quando os pontos da abertura são atingidos pela frente de onda eles tornam-se fontes secundárias que mudam a direção de propagação da onda principal, contornando o obstáculo.

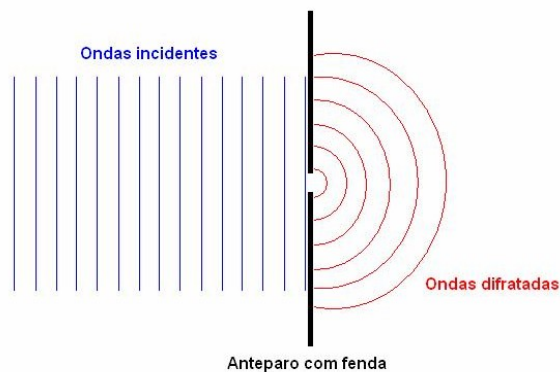


Figura 2.5: Difração de ondas por uma abertura.

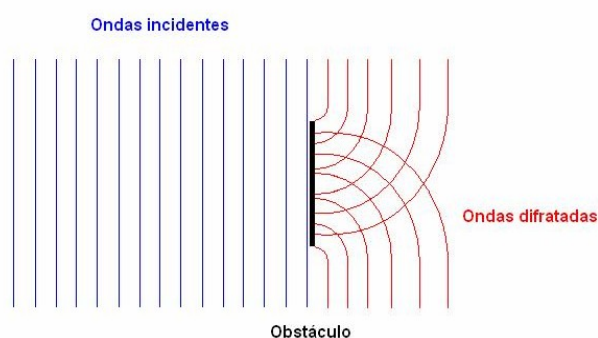


Figura 2.6: Difração de ondas por um obstáculo.

\* Princípio de Huygens (1629-1695): Cada ponto de uma frente de onda pode ser considerado como uma fonte de ondas secundárias, produzidas no sentido de propagação e com a mesma velocidade do meio. No instante posterior, a nova frente de onda é a superfície que tangencia essas ondas secundárias.

O fenômeno da difração somente é nítido quando as dimensões da abertura ou do obstáculo forem da ordem de grandeza do comprimento de onda da onda incidente.

Através da difração as ondas podem contornar obstáculos, o que por exemplo, permite que escutemos a voz de uma pessoa mesmo que estejamos atrás de um anteparo.

### 2.1.6 – INTERFERÊNCIA

Interferência é o fenômeno de superposição de duas ou mais ondas, podendo ser construtiva ou destrutiva. A interferência construtiva acontece quando a onda resultante apresenta uma amplitude maior que as ondas primárias. Isto ocorre quando as ondas em interferência estão em fase. A interferência destrutiva acontece quando a onda resultante apresenta uma amplitude menor que as ondas primárias, e ocorre quando as ondas em interferência estão fora de fase.

Na figura 2.7 é mostrada uma interferência construtiva entre duas ondas de fontes coerentes\*. A figura 2.8 mostra como se dá a interferência destrutiva de duas ondas de mesma frequência e amplitude, porém em oposição de fase.

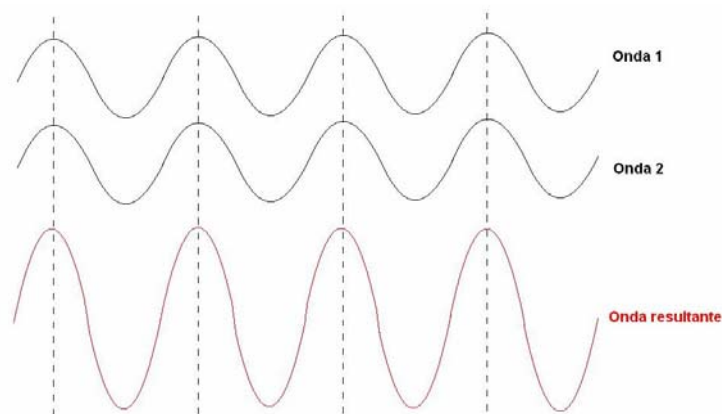
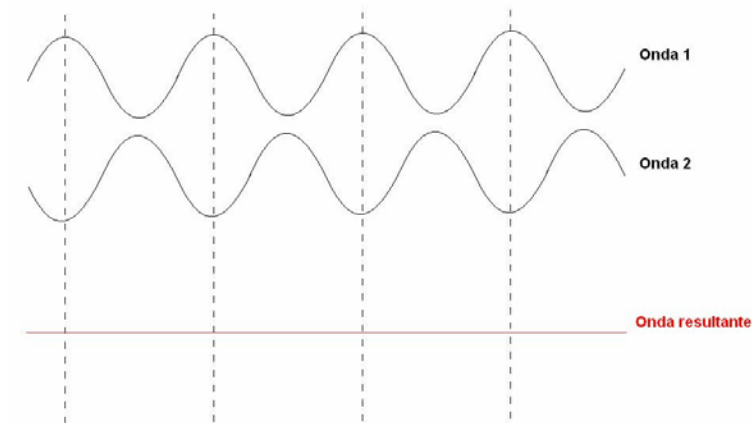


Figura 2.7: Esquema de interferência construtiva entre duas ondas de fontes coerentes.

---

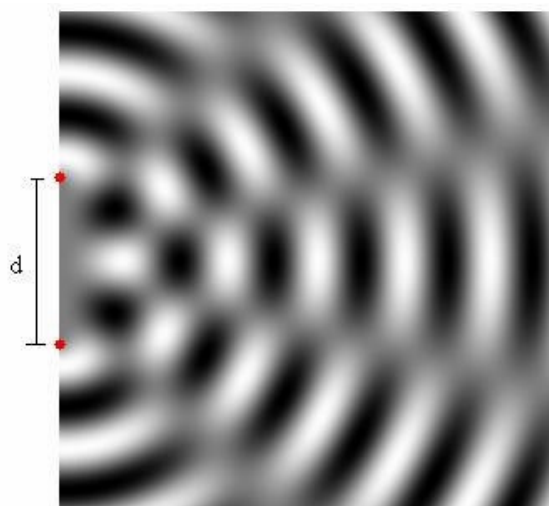
\* Fontes coerentes são fontes emissoras de ondas que possuem mesma frequência e mantêm uma diferença de fase constante.





**Figura 2.8: Aniquilação de ondas através da interferência destrutiva de fontes em oposição de fase.**

As figuras 2.7 e 2.8 mostram, respectivamente, interferência construtiva e destrutiva isoladamente. Porém estes fenômenos podem ocorrer simultaneamente durante a superposição de ondas, como é mostrado na figura 2.9, onde tem-se duas fontes emissoras de ondas planas, separadas por uma distância  $d$ . Nesta figura pode-se ver áreas de interferência construtiva e áreas de interferência destrutiva.



**Figura 2.9: Padrão de interferência entre duas ondas planas.**

### **2.1.7 – ATENUAÇÃO**

Ao se propagar em um material, a onda ultra-sônica perde energia por diversos processos, o que pode resultar em uma perda de amplitude, como também uma mudança na forma do pulso ultra-sônico.

A atenuação é a diminuição da intensidade do feixe sonoro ao atravessar um material. Ela é diretamente proporcional à frequência do transdutor, ou seja, quanto maior a frequência do transdutor maior será a atenuação do feixe sonoro. Para compensar a atenuação os equipamentos possuem recursos de ampliação, denominados controles de ganho.

Os principais fenômenos que resultam na diminuição da energia do pulso são: espalhamento, absorção e a divergência do feixe ultra-sônico. Além destes fenômenos podemos citar também a impedância acústica como um importante fator de atenuação (CAETANO, 2003)

#### **2.1.7.1 – ESPALHAMENTO**

O processo de espalhamento é bastante discutido na literatura, a qual apresenta diversas descrições para este, que em alguns casos chegam a ser conflitantes. Diante disto, depois de diversas discussões e pesquisas, os autores concordaram em adotar a explicação de espalhamento encontrada em *Alonso, M. & Finn, E. J. “Física – um curso universitário”*, a qual é descrita da seguinte forma:

*“Suponhamos por exemplo que uma esfera de material elástico seja suspensa no ar e que uma onda acústica ou de compressão seja produzida nas proximidades. Quando a onda passa ao redor da esfera, sofre, antes de tudo, uma difração do tipo discutido anteriormente. Mas, além disso, devido às flutuações de pressão que acompanham a onda, a esfera elástica sofre deformações oscilatórias. As oscilações da superfície da esfera por sua vez, produzem novas perturbações ou ondas no ar circundante; essas ondas superpõem-se às ondas iniciais. As novas ondas produzidas pela esfera oscilantes são as ondas espalhadas, e o processo é chamado de espalhamento.”*

Existem diversos tipos de espalhamentos que são basicamente classificados em:

- Difuso - quando o comprimento de onda é menor que o tamanho do espalhador;
- Estocástico – quando o comprimento de onda é da ordem do tamanho do espalhador;
- Rayleigh – quando o comprimento de onda é muito maior que o tamanho do espalhador.

Assim, o espalhamento depende diretamente da relação entre o comprimento de onda da onda ultra-sônica e as dimensões do agente causador do espalhamento, como por exemplo o tamanho de grão. Em alguns casos, a determinação do grau de espalhamento pode ser usada como base para aceitação ou rejeição de materiais (CAETANO, 2003).

Porém, neste trabalho é feita uma abordagem inicial, explicando como ocorre o fenômeno fundamental, não se preocupando com suas especificidades.

### **2.1.7.2 – ABSORÇÃO**

O fenômeno de absorção ocorre fundamentalmente pela conversão da energia mecânica da onda em energia térmica. Na absorção, o material é aquecido devido ao atrito do movimento elástico das partículas durante a propagação do pulso. Um exemplo prático disto é quando em um dia frio, esfregamos as mãos para nos aquecer, desta forma estamos convertendo a energia mecânica do movimento das mãos em energia térmica, devido ao atrito entre a superfície das mãos.

Essa conversão de energia mecânica em energia térmica é mais pronunciada quando as oscilações são mais rápidas, isto é, em altas frequências (esfregando as mãos mais rápido, se mantivermos a analogia), logo, para a maioria dos materiais as perdas por absorção aumentam diretamente com o aumento da frequência.

### 2.1.7.3 – DIVERGÊNCIA DO FEIXE

Outro fenômeno físico que é responsável pela perda de parte da intensidade ou energia da onda sônica é a divergência que ocorre a medida que nos afastamos da fonte emissora das vibrações acústicas (Figura 2.10).

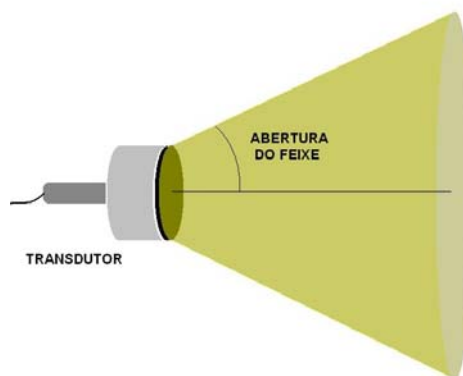
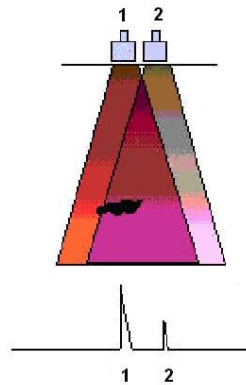


Figura 2.10: Esquema mostrando a divergência do feixe ultra-sônico.

Tal fenômeno pode ser observado detectando um defeito pequeno com o feixe ultra-sônico central do transdutor, em que nestas condições a amplitude do eco na tela do aparelho é máxima. Porém quando afastamos o transdutor lateralmente ao defeito, a amplitude diminui, indicando uma queda da sensibilidade de detecção do mesmo defeito. Quanto mais próximo da borda do feixe sônico estiver esta descontinuidade, menor será a amplitude do eco.

A figura 2.11 mostra a diferença de sensibilidade (amplitude do eco de reflexão) quando detectamos o defeito com o feixe ultra-sônico central (1) e quando detectamos o mesmo defeito com a borda do feixe ultra-sônico (2).



**Figura 2.11: Variação da intensidade do pulso refletido por um anteparo em função da divergência do feixe (Andreucci, 2002).**

#### **2.1.7.4 – IMPEDÂNCIA ACÚSTICA**

Impedância acústica é a resistência oferecida pelos materiais à propagação das ondas ultra-sônicas, ou seja, é a propriedade que os materiais possuem de transmitir uma vibração acústica com maior ou menor facilidade. A impedância acústica ( $Z$ ) de um material pode ser definida em função da densidade ( $\rho$ ) do material e da velocidade ( $V$ ) do pulso ultra-sônico neste meio, através da seguinte relação:

$$Z = \rho V \quad (4)$$

A impedância acústica é um efeito importante em sistemas de inspeção de materiais compostos por mais de uma interface, pois quando dois materiais com impedâncias acústicas diferentes são justapostos, a passagem de uma vibração mecânica (ondas sonoras) pode ser refletida devido a essa diferença de impedância acústica entre os materiais, fazendo com que parte do feixe ultra-sônico que atinge a interface seja refletido e parte seja transmitido para o segundo meio (CAETANO, 2003).

Assim, o pulso ultra-sônico ao encontrar uma descontinuidade de impedância acústica é refletido parcial ou totalmente. Como já foi visto, quanto maior a reflexão do feixe sonoro, menor a transmissão do som de um meio para o outro. Por

exemplo, a diferença de impedância entre o ar e os metais justifica a necessidade de um gel para melhorar o acoplamento do transdutor, caso contrário o feixe seria refletido por causa da grande diferença de impedância acústica na interface transdutor/metal. A tabela abaixo relaciona alguns Materiais e suas respectivas impedâncias acústicas.

**Tabela 2.1: Impedância acústica de alguns materiais (GOMEZ F. Ramirez, 1980).**

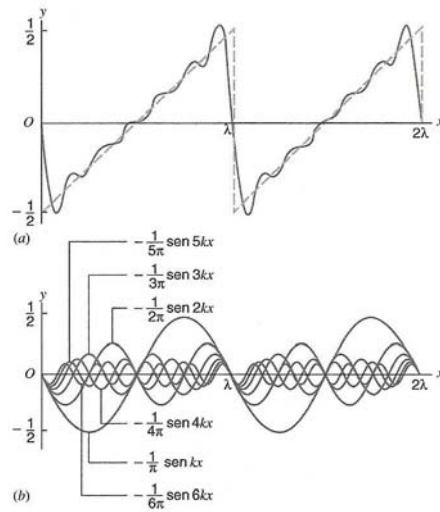
Material	Densidade ( $10^3 \text{kg/m}^3$ )	Impedância Acústica ( $10^6 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )
Óleo (SAE30)	0,96	1,6
Água	1	1,48
Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	3,7	37
$\text{UO}_2^*$	9,8	40,9
Glicerina	1,26	2,4
Aço	7,85	4,57
Ar ou gás	0,0012	0,00039
Aço inoxidável	8,03	4,54
Alumínio	2,71	1,71
Acrílico	1,18	3,1

### 2.1.9 – DISPERSÃO

O princípio da superposição de ondas é importante pois permite que se analise um movimento de ondas complexas como uma combinação de ondas simples. De fato, como foi demonstrado pelo matemático francês J. Fourier (1768-1830), a forma de qualquer onda pode ser representada como uma combinação de componentes (ondas) simples, como pode ser visto na Figura 2.12. Em (a) a linha tracejada é uma onda dente-de-serra comumente encontrada em aparelhos eletrônicos. Ela pode ser representada com uma série de ondas senoidais. Em (b) são mostradas as primeiras seis ondas senoidais da Série de Fourier que representam o dente-de-serra e a sua soma é indicada através de uma curva contínua na parte (a). Incluindo-se outros termos na Série de Fourier, obtém-se uma aproximação melhor da onda.

---

\* Valores estimados.



**Figura 2.12: Combinação de ondas (Halliday, 2004).**

As freqüências, amplitudes e fases das ondas senoidais componentes, devem ser cuidadosamente escolhidas de acordo com um procedimento matemático prescrito, conhecido como Análise de Fourier, para que o resultado final seja a forma de onda desejada.

Portanto, quando uma onda incidente em um meio, em vez de ser harmônica (freqüência única), for composta de diversas freqüências (componentes) ou comprimentos de onda superpostos, ao refratar-se em um meio cujo índice de refração depende da freqüência ou do comprimento de onda (meio dispersivo), cada onda componente irá se propagar com uma velocidade diferente. A este fenômeno dá-se o nome de dispersão.

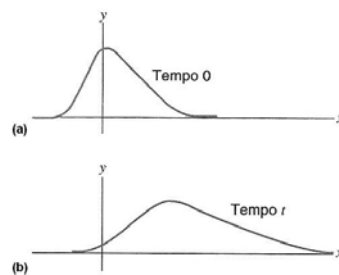
Um exemplo prático deste fenômeno com luz (ondas eletromagnéticas), é a formação do arco-íris, que pode ser reproduzido fazendo-se *luz branca*\* passar por um prisma, decompondo o feixe de luz incidente em diversos feixes de luz coloridos.

Mais especificamente no caso de sinais ultra-sônicos, o pulso viaja sem sofrer distorções quando o material é não dispersivo. A dispersão ocorre quando algumas freqüências do pulso inicial são atrasadas em relação às outras, devido a variação

\* Ao se analisar o espectro visível das ondas eletromagnéticas, cada freqüência é percebida como uma cor por nossos olhos. A cor branca, como foi demonstrado por Isaac Newton (1643-1727), é na verdade uma mistura de diversas cores, ou seja, diversas freqüências.

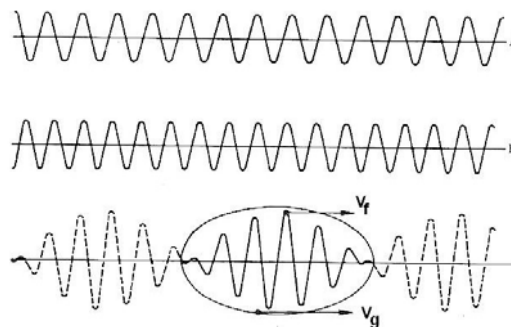
de velocidade de propagação das frequências do espectro do pulso inicial em meios dispersivos.

A Figura 2.13 mostra um pulso propagando-se através de um meio. O perfil do pulso se modifica durante a propagação; o pulso se alarga ou dispersa, mas é importante notar que durante o fenômeno de dispersão, a energia do pulso permanece constante ao se propagar, mesmo que o pulso se disperse, pois o meio em questão é dispersivo, isto é, a velocidade é função da frequência, e não dissipativo.



**Figura 2.13: Em um meio dispersivo, as formas de onda se modificam durante sua propagação (Halliday, 2004).**

Se tomarmos como exemplo, duas formas de onda A e B, que possuem diferentes frequências como mostra a figura 2.14, existindo simultaneamente em uma amostra de teste, e assumirmos que a relação entre as fases das duas formas de onda são como mostradas, a superposição destas ondas resulta em um pulso com a forma mostrada na figura 2.14.



**Figura 2.14: Formação do pulso pela superposição de formas de onda contínuas (Bray D. E.; Stanley R. K., Nondestrutive evaluation, 1997)**



A formação deste pulso se dá pela superposição de duas ondas, que é o fenômeno de interferência, onde neste caso particular ocorre o *batimento*\*.

Esta forma de onda só se mantém constante no caso de se propagar em um meio não dispersivo. Em um meio dispersivo, as formas de onda das componentes A e B não se modificam, mas cada onda poderá propagar-se com uma velocidade diferente. Nesse caso, a forma da onda combinada muda à medida que a relação de fase entre as componentes se altera.

Se analisarmos as formas de onda A e B, e estas possuírem velocidades idênticas, o pulso resultante viajará sem sofrer distorções devido ao efeito de dispersão. Porém, se estas velocidades forem diferentes, a distorção ocorrerá.

Assim torna-se necessário definir a velocidade de fase ( $V_f$ ) que é a velocidade do ponto com fase constante no pulso, e a velocidade de grupo ( $V_g$ ) que é a velocidade do pulso inteiro, comumente utilizada nas técnicas ultra-sônicas. Em outras palavras: para o caso não dispersivo  $V_f=V_g$ , a velocidade de fase é igual a velocidade de grupo, e assim o pulso não sofre distorções; e no caso dispersivo o pulso resultante (nos equipamentos de ultra-som o que se mede é a velocidade de grupo, que define o pulso) pode se mover com velocidade diferente da velocidade de fase ( $V_f \neq V_g$ ). Como em geral os materiais são dispersivos a distorção do pulso é inevitável.

### **2.1.2 – TIPOS DE ONDAS**

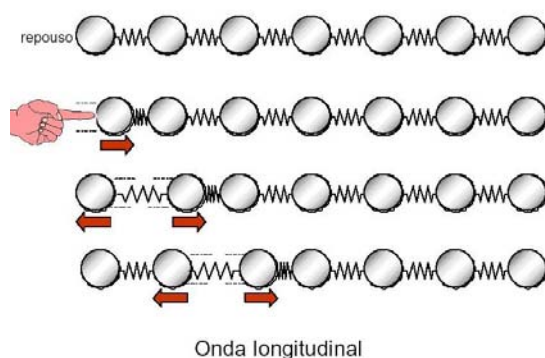
Se assumirmos que o meio em estudo é elástico, ou seja, que as partículas que o compõem estão ligadas com certa rigidez, mas que podem oscilar em qualquer direção, o deslocamento de uma partícula induz a um deslocamento de partículas vizinhas e assim por diante, propagando desta maneira uma onda elástica. Desta forma pode-se classificar as ondas mecânicas como: ondas longitudinais; ondas transversais (cisalhantes); e ondas superficiais e subsuperficiais.

---

\* O batimento acontece quando existe uma superposição entre duas ondas que possuem a mesma direção, amplitude e frequências próximas. Devido a pequena diferença de frequência, haverá momentos de interferência construtiva, onde a amplitude resultante será grande, e momentos de interferência destrutiva, onde a amplitude resultante será pequena, como mostrado no pulso resultante da figura 2.15.

### 2.2.1 – ONDAS LONGITUDINAIS

Uma onda é longitudinal ou de compressão quando as partículas do meio em que ela se propaga vibram na mesma direção de propagação da onda nesse meio. Estas ondas de compressão percorrem os materiais como uma série alternada de zonas de compressão e rarefação, nas quais as partículas transmitem a vibração movendo-se para frente e para trás, no mesmo sentido da propagação da onda. As ondas longitudinais são geradas quando o primeiro plano de partículas próximas à superfície são acionadas na direção perpendicular a esta, defletindo-se e transferindo sua energia cinética aos planos subsequentes. Como a ligação entre as partículas é elástica, haverá um atraso desde o momento do impacto inicial, passando de plano a plano, como mostrado na figura 2.15.



**Figura 2.15: Propagação das ondas longitudinais.**

Na figura acima nota-se que o primeiro plano de partículas vibra e transfere sua energia cinética para os próximos planos de partículas, que passam a oscilar. Desta maneira todo o meio elástico vibra na mesma direção de propagação da onda. As distâncias entre duas zonas de compressão determinam o comprimento de onda.

As ondas longitudinais propagam-se nos sólidos, líquidos e gases. Em líquidos e gases as ondas propagam-se na forma de mudanças locais na densidade (flutuação da pressão) pela colisão entre as moléculas com as adjacentes. Em decorrência do processo de propagação, este tipo de onda possui alta velocidade de propagação, que é uma característica do meio. Na tabela 2.2 tem-se a velocidade de propagação da onda longitudinal para diversos meios

**Tabela 2.2: velocidade da onda longitudinal para diversos meios (GOMEZ F. Ramirez, 1980).**

Meio	Velocidade long. (m/s)
Ar	330
Água	1483
Alumina*	3500 a 10000
UO <sub>2</sub> **	4500 a 5200
Óleo (SAE30)	1740
Acrílico	2670
Ouro	3240
Prata	3600
Cobre	4700
Níquel	5630
Aço inoxidável	5660
Magnésio	5770
Aço	5820
Titânio	6005
Alumínio	6320

### **2.2.2 – ONDAS TRANSVERSAIS**

Nas ondas transversais ou cisalhantes, as partículas movem-se perpendicularmente à direção de propagação da onda neste meio. As ondas transversais são geradas quando as partículas vibram na direção transversal a direção de propagação do pulso ultra-sônico. No caso de incidência normal, por exemplo, as partículas próximas à superfície são acionadas na direção paralela a esta superfície. Quando o primeiro plano se desloca, ele arrasta pela, interação elástica, o plano adjacente e assim por diante, criando vales e cristas nos pontos laterais.

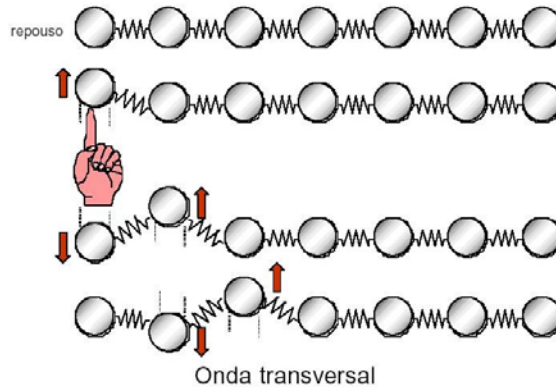
Os planos das partículas mantêm-se equidistante, movimentando-se lateralmente com ação cisalhante entre eles. Para que ocorra este tipo de propagação de onda é necessário que as partículas apresentem uma grande força de atração com as partículas próximas, como acontece com os materiais sólidos. Já nos líquidos e gases as ondas transversais não podem se propagar em razão da

---

\* Valores estimados em referência a velocidade transversal medida em nosso laboratório.

\*\* Valores obtidos em “Use of ultrasonic velocity for measurement of density of sintered fuel pellets”, Panakkal J P, Ghosh J K, Roy P R, 1984.

pequena força de coesão existente entre as partículas destes meios. A figura 2.16 ilustra a propagação de uma onda transversal.



**Figura 2.16: Propagação das ondas transversais.**

O comprimento de onda é a distância entre dois vales ou dois picos. As ondas transversais propagam-se com uma velocidade aproximadamente de 50% da velocidade das ondas longitudinais no mesmo meio (Tabela 2.3).

**Tabela 2.3: velocidade da onda transversal para diversos meios (GOMEZ F. Ramirez, 1980).**

Meio	Velocidade trans. (m/s)
Ar	-
Água	-
Óleo (SAE30)	-
Alumina*	2000 a 6000
UO <sub>2</sub> **	2500 a 3000
Acrílico	1120
Ouro	1200
Prata	1590
Cobre	2260
Níquel	2960
Aço Inoxidável	3120
Magnésio	3050
Aço	3190
Titânio	3019
Alumínio	3080

\* Valores medidos em nosso laboratório e que variaram fortemente em função da porosidade.

\*\* Valores estimados em referência a velocidade longitudinal encontrada na literatura.

### 2.2.3 – ONDAS SUPERFICIAIS E SUBSUPERFICIAIS

As ondas longitudinais e cisalhantes são denominadas de ondas volumétricas e se propagam no interior dos materiais. Já as ondas superficiais de Rayleigh e de Lamb são denominadas como ondas guiadas. A geração das ondas superficiais e subsuperficiais se dá através da modificação do ângulo de incidência, onde o feixe ultra-sônico pode ser trazido para uma camada próxima da superfície do material devido à *conversão de modo*\*. Conversão de modo esta que pode gerar em especial dois tipos de ondas, que são as chamadas de ondas livre de dispersão ( $SH_0$ ) ou ondas cisalhantes horizontais de ordem zero (em inglês, “dispersion free  $SH_0$ ” ou “shear horizontal zero order”) e as ondas subsuperficiais (SSL), também chamadas de rastejante ou de ondas longitudinais criticamente refratadas (LCR) (em inglês, “subsurface longitudinal”, “skimming longitudinal” ou “critically refracted longitudinal”) (Ortega, 2001).

#### a) Ondas de Rayleigh

As ondas superficiais são chamadas de ondas de Rayleigh quando uma onda transversal percorre a superfície de um material sólido, propagando-se semelhante às ondas na superfície das águas apresentando um movimento elíptico, conforme mostrado na Figura 2.17.

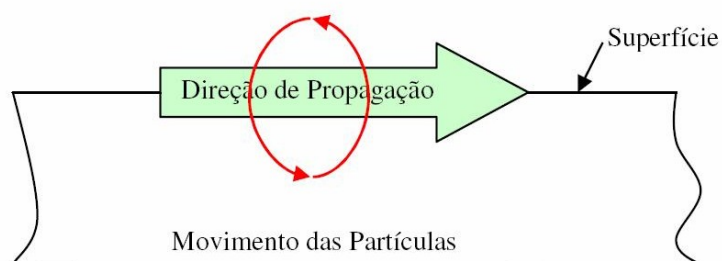


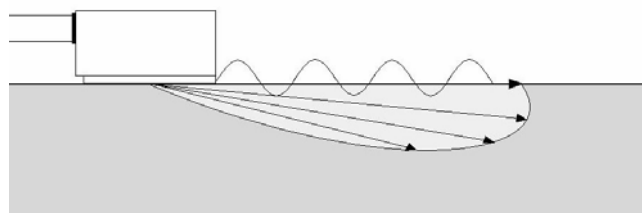
Figura 2.17: Movimento que ocorre na propagação das ondas de Rayleigh (Matarezi, 2001)

\* A conversão de modo consiste na transformação de um tipo de onda em outro em função da variação do ângulo de incidência do pulso ultra-sônico.

A condição para ser gerada este tipo de onda pode ser obtida pela *Lei de Snell-Descartes*<sup>\*</sup>, através do cálculo do segundo ângulo crítico, que é aquele em que a onda transversal tangencia a superfície do material. As ondas Rayleigh são livres: a movimentação das partículas é perpendicular à superfície e ocorre apenas em uma camada fina, de espessura próxima a um comprimento de onda. As forças de tração devem desaparecer no contorno e a energia da onda deve decair com a profundidade.

Devido à divergência do feixe ultra-sônico, a onda transversal também percorre a região subsuperficial. As ondas de Rayleigh conseguem percorrer superfícies curvas desde que o raio de curvatura do material seja maior que o comprimento de onda da mesma.

Em geral, a velocidade de propagação destas ondas é dada em função das ondas transversais, e é de aproximadamente 92% da velocidade da onda transversal no mesmo material. A figura 2.18 mostra a propagação de um feixe de ondas Rayleigh. Maiores detalhes sobre este tipo de onda podem ser vistos em *Um estudo sobre o dimensionamento de discontinuidades superficiais pela técnica ultra-sônica do tempo decorrido*, Lamy, Carlos Alfredo, 1990.



**Figura 2.18: Propagação das ondas de Rayleigh.**

### **b) Ondas Love**

As ondas de Love são do tipo  $SH_0$  (shear horizontal) e propagam-se na superfície do material, sem componente normal. Apresentam um movimento

---

<sup>\*</sup> A Lei de Snell-Descartes relaciona as velocidades com os ângulos de incidência e refração das ondas através da equação:  $V_1 \text{sen} \theta_2 = V_2 \text{sen} \theta_1$ , onde  $V_1$  e  $\theta_1$  são respectivamente a velocidade da onda no primeiro meio e seu ângulo de incidência.  $V_2$  é velocidade da onda refratada no segundo meio e  $\theta_2$  seu ângulo de refração.

paralelo à superfície e transversal em relação à direção de propagação do feixe, conforme mostrado na figura 2.19.

Sua aplicação restringe-se a inspeção de camadas finas de materiais que recobrem materiais de maior impedância acústica (por exemplo, chapas galvanizadas ou com eletrodeposição) (Matarezzi, 2001).

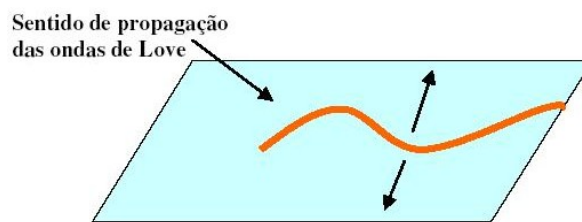


Figura 2.19: Propagação das ondas de Love (Matarezzi, 2001).

### c) Ondas Creeping

As ondas do tipo Creeping são ondas geradas no primeiro ângulo crítico, que é aquele em que a onda longitudinal sai tangente a superfície do material. Deste modo as ondas Creeping podem ser definidas como ondas longitudinais na superfície do material. Atualmente existem transdutores projetados especialmente para produzir ondas Creeping, utilizados para a detecção de descontinuidades superficiais e subsuperficiais em soldas. Este tipo de onda apresenta uma característica de ser fortemente atenuada pelo fato de que a cada ponto em seu deslocamento uma onda transversal é gerada e transmitida para o interior do material com um certo ângulo. Isto é mostrado na Figura 2.20.

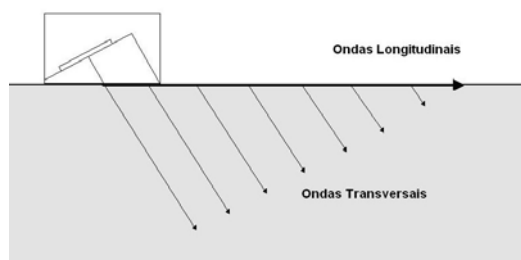
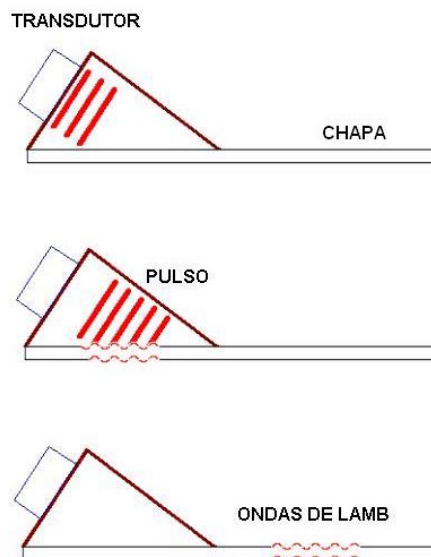


Figura 2.20: Propagação das Ondas Creeping (adaptado de Santin, 1993).

#### d) Ondas Lamb

As ondas de Lamb ou de Chapa como também são conhecidas, são ondas ultra-sônicas que são guiadas entre duas superfícies paralelas do sólido (chapa mostrada na figura 2.21). As ondas de Lamb consistem em uma vibração complexa das partículas ao longo da espessura de chapas muito finas, da ordem de um comprimento de onda. Este tipo de onda é gerada em chapas finas, por meio de ondas longitudinais de velocidade e frequência pré-determinada e transmitida sobre um ângulo de incidência específico. A propagação das ondas de Lamb depende da densidade, propriedades elásticas, estrutura do material e principalmente da espessura da chapa.



**Figura 2.21: Propagação das ondas Lamb.**

As ondas de Lamb são classificadas em simétricas e assimétricas, sendo que cada modo se propaga com uma velocidade de fase que depende da espessura da chapa e da frequência, sendo no aço geralmente entre 2000m/s e 4000m/s, mas pode-se encontrar velocidades de 1000m/s e até um pouco acima de 5000m/s.

A transmissão das ondas Lamb é feita em pulso curtos com uma faixa de frequência relativamente ampla. Este fato implica em uma grande dispersão da onda. O uso das ondas Lamb é limitado à inspeção de chapas muito finas. Pode-se detectar mudanças geométricas e o efeito de laminações.



### e) Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (LCR)

As ondas LCR, Longitudinais Criticamente Refratadas, são ondas longitudinais geradas por um transdutor montado sobre uma cunha de acrílico com um ângulo de incidência próximo do primeiro ângulo crítico (diferente das ondas Creeping que são geradas exatamente no primeiro ângulo crítico), ou seja, são ondas compressivas viajando quase tangencialmente à superfície livre de um sólido. As ondas LCR coexistem com as chamadas ondas frontais (do inglês “head waves”) que são ondas cisalhantes que se propagam no ângulo crítico de  $33^\circ$ , geradas por transformações de modo, atendendo de maneira conjunta as condições de contorno de tensão nula na superfície do sólido. As ondas LCR se movem com velocidade igual à velocidade das ondas longitudinais volumétricas, mas devido à geração contínua de ondas frontais, a sua energia decai abruptamente, o que faz com que existam apenas numa curta distância. De fato, sua amplitude é proporcional a  $(1/r^n)$ , onde  $r$  é a distância e  $n$  varia de 1,5 a 2,0. Assim, são fortemente atenuadas quando comparadas às ondas volumétricas, para as quais  $n$  varia de 0,5 a 1,0. As ondas LCR mostram baixa sensibilidade à rugosidade superficial, uma vez que a distribuição da amplitude da pressão acústica destas é tal que a sensibilidade máxima dos raios ocorre a um ângulo entre  $10^\circ$  a  $20^\circ$  da superfície livre, conforme mostrado na figura 2.22 (Ortega, 2001).

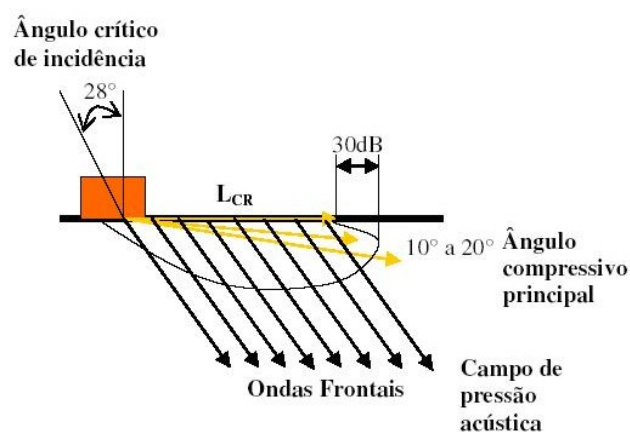


Figura 2.22: Distribuição do campo de pressão das ondas LCR (Ortega, 2001)

### **2.2.10 – EFEITO PIEZOELÉTRICO E EFEITO LIPPMANN**

O efeito Piezoelétrico é um fenômeno que ocorre com os cristais anisotrópicos, nos quais desenvolvem-se cargas elétricas quando os cristais são submetidos a deformações mecânicas. Este fenômeno foi descoberto por Pierre e Jacques Currie em 1880 e manifesta-se da seguinte forma: aplicando-se cargas mecânicas nas duas faces opostas de uma lâmina de cristal de quartzo, ocorre a formação de cargas elétricas de polaridades contrárias nessas faces, isto é, em uma das faces formam-se cargas positivas e, na outra, cargas negativas. Experiências mostraram que as cargas elétricas desenvolvidas na lâmina de cristal são proporcionais às cargas mecânicas aplicadas.

No ano seguinte (1881), Lippmann apresentou sua teoria de que o fenômeno Piezoelétrico também deveria possuir um fenômeno inverso ou recíproco, portanto, o efeito Lippmann é o efeito recíproco do efeito Piezoelétrico. Neste caso, observam-se deformações mecânicas nos cristais quando são submetidos a tensões elétricas. O fenômeno se manifesta aplicando-se nas faces opostas de uma lâmina cristalina (às quais se aplicam eletrodos) cargas elétricas positivas (de um lado) e negativas (outro lado). Estas cargas provocam uma deformação no cristal, análoga à deformação sofrida pela lâmina no efeito Piezoelétrico. Aplicando-se uma tensão a uma lâmina de cristal piezoelétrico, ocorre uma deformação (expansão) positiva na espessura da lâmina. Invertendo-se a polaridade da tensão, ocorre também uma inversão na deformação, isto é, uma contração. Se for aplicada uma tensão alternada na lâmina do cristal, ela sofrerá deformações sucessivas, passando a vibrar. A lâmina se contrairá na primeira metade do ciclo da corrente alternada e se expandirá na outra metade. A frequência de vibração mecânica será a mesma da tensão alternada. Se a lâmina for cortada do bloco de cristal, de tal forma que sua frequência de vibração natural coincida com a frequência de vibração ou tensão que lhe foi aplicada, ocorrerá o fenômeno da ressonância na lâmina e a amplitude da vibração será máxima. Neste caso existe a transformação de energia elétrica em mecânica. Todos os dispositivos que transformam uma espécie de energia em outra são chamados de transdutores. No equipamento de ultra-som o efeito Lippmann é usado para gerar pulsos ultra-sônicos. Os transdutores, podem gerar vibrações mecânicas de alguns poucos Hertz, até cerca de 250 MHz). A faixa do ultra-som industrial é de 0,5 MHz a 15 MHz.

## 2.2 – TRANSDUTORES

Os transdutores ou cabeçotes possuem basicamente um cristal piezoelétrico em seu interior, envolto por uma capa metálica responsável pela proteção, com conectores elétricos que têm a função de conectar o transdutor ao aparelho de ultra-som que ao variar a tensão aplicada ao cristal, faz com que este vibre emitindo ondas sônicas. Dentro da armação ainda existe um bloco amortecedor, para impedir que o cristal continue vibrando depois de cessarem os pulsos elétricos. Na parte inferior do transdutor existe uma proteção, para impedir o contato direto do cristal com a peça, como pode ser visualizado na Figura 2.23.

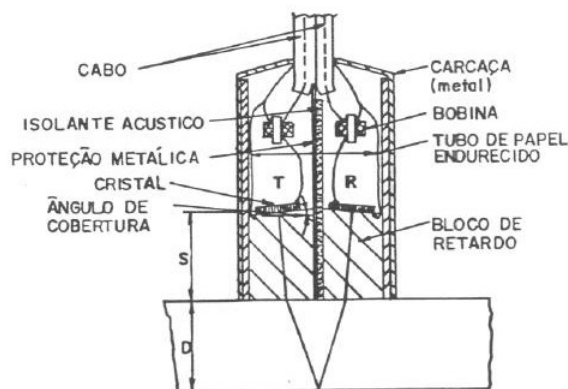


Figura 2.23: Exemplo de esquema de um transdutor do tipo SE acoplado a uma superfície.

Os transdutores são classificados em três grandes categorias: os normais, os angulares e os SE (emissor e receptor). Dentro de cada categoria os cabeçotes podem ser de contato direto ou por imersão. Os transdutores de contato direto trabalham muito próximos da peça, porém separados por uma fina camada de acoplante, já os de imersão trabalham dentro do acoplante (geralmente a água), ficando distantes da peça. Os transdutores por imersão normalmente são usados em máquinas automáticas de ultra-som construídas para trabalhos específicos.

Os transdutores de ultra-sons são usados principalmente em ensaios para detecção de descontinuidades no interior de peças metálicas. O dispositivo, além de transformar energia elétrica em mecânica, transforma também energia mecânica em elétrica, podendo enviar e receber sinais ultra-sônicos.

### **2.2.1 – ACOPLANTES**

Ao acoplarmos o transdutor sobre a peça a ser inspecionada, imediatamente se estabelece uma camada de ar entre a base do transdutor e a superfície da peça. Esta camada de ar impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propaguem para a peça em razão das características acústicas (impedância acústica) diferentes entre o acrílico do transdutor e do ar. A impedância acústica "Z" é definida como sendo o produto da densidade do meio ( $\rho$ ) pela velocidade de propagação neste meio ( $V$ ), ( $Z = \rho.V$ ). Como exemplo podemos citar que a interface água e aço, apenas transmite 12% e reflete 88% da energia ultra-sônica. Por esta razão, deve-se usar um meio líquido ou pastoso que estabeleça uma redução desta diferença, e permita a passagem das vibrações para a peça. Tais líquidos ou pastas, denominados acoplantes são escolhidos em função do tipo de onda utilizada, acabamento superficial da peça, condições técnicas e tipo da peça. A tabela 2.1 relaciona a impedância acústica de diversas matérias, entre eles alguns acoplantes muito utilizados, como água e glicerina.

### **2.2.2 – MÉTODO DE UTILIZAÇÃO DE TRANSDUTORES**

De acordo com a aplicação realizada, as inspeções utilizando técnicas ultra-sônicas podem adotar diferentes métodos de utilização de transdutores. Em geral são utilizados dois métodos: a transmissão, e o pulso-eco.

#### **2.2.2.1 – TRANSMISSÃO**

Nesta técnica, utilizam-se dois transdutores para se fazer a inspeção. Um transdutor funciona como emissor e o outro transdutor colocado geralmente na superfície oposta ao primeiro transdutor (porém dependendo do tipo de transdutor, onda, e análise realizada, o segundo transdutor pode ser colocado na mesma superfície, porém a uma certa distância do emissor), funciona como receptor. Assim, o pulso ultra-sônico emitido pelo primeiro transdutor atravessa o material e é captado pelo segundo transdutor, como mostra a Figura 2.24.

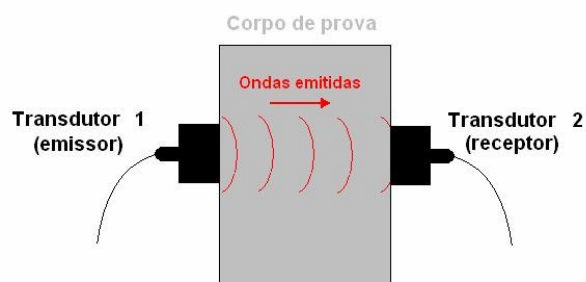


Figura 2.24: Exemplo de esquema de transdutores sendo utilizados no modo transmissão.

### 2.2.2.2 – PULSO-ECO

Esta técnica utiliza apenas um transdutor, que funciona como emissor e receptor. É bastante utilizada por ser simples e não necessitar de acesso a face oposta do corpo de prova para realizar a inspeção.

O pulso emitido pelo transdutor é refletido pela face oposta e retorna ao transdutor (Figura 2.25). Assim, o pulso percorre duas vezes a espessura do material desde sua emissão até sua captura. Isto pode ser uma dificuldade em inspeções de materiais muito dispersivos, fazendo com que o sinal seja fortemente atenuado, podendo criar condições que impossibilitem sua análise.

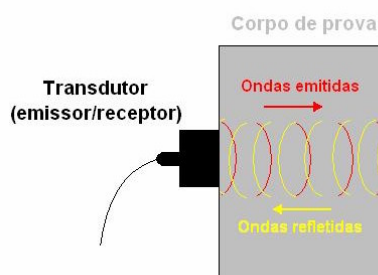


Figura 2.25: Esquema de transdutor sendo utilizado no modo pulso-eco.

## 2.3 – REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Nesta seção abordaremos as ferramentas utilizadas no reconhecimento dos sinais ultra-sônicos e seus conceitos principais, falando brevemente sobre a utilização de redes neurais artificiais, seu funcionamento, tipos de redes e treinamento.

### 2.3.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

As redes neurais artificiais (RNA), são modelos computacionais inspirados na estrutura e funcionamento de neurônios biológicos.

Na figura 2.26 está esquematizado um neurônio e os seus constituintes. Os sinais que chegam ao neurônio são recebidos pelos dendritos, que os combinam de determinada forma e os transmitem para o corpo da célula. Este efetua a interpretação dos sinais que são, então, transmitidos pelos axônios. A junção entre um axônio e um dendrito corresponde à sinapse, onde através de um processo químico, se efetua a transferência do sinal ajustando a sua amplitude. O processo de aprendizagem do cérebro, ao que se julga, consiste no ajuste dessas amplitudes (Chapman e Crossland, 1995).

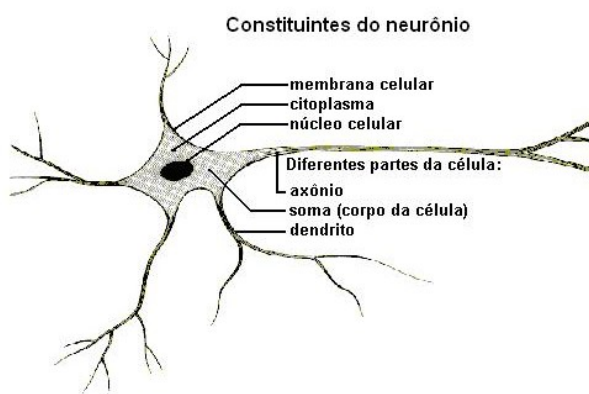
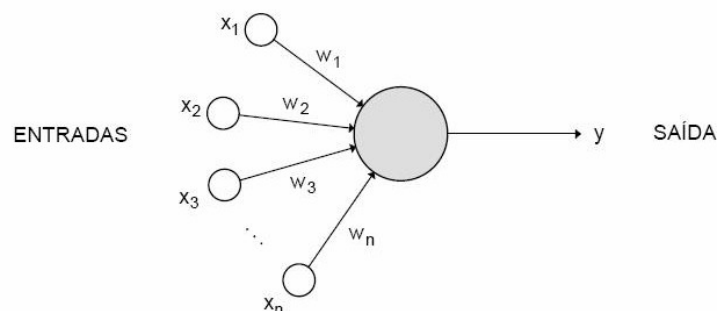


Figura 2.26: Esquema mostrando um neurônio e seus constituintes.

A rede neural artificial é um conjunto de elementos simples de computação com grande interligação, que simulam neurônios biológicos e são interconectados por um conjunto de pesos (análogo às conexões sinápticas no sistema nervoso), o qual permite tanto processamento serial quanto paralelo de informação através da rede (Astion & Wilding, 1992; Roush *et al.*, 1996; Xin, 1999). Os “neurônios da rede podem receber entradas excitatórias ou inibitórias de outros neurônios (Forsström & Dalton, 1995) e produzem uma saída, que geralmente é uma função não linear da entrada da rede (Astion & Wilding, 1992). Para incitar o comportamento das sinapses, os terminais de entrada do neurônio artificial têm pesos cujos valores podem ser maiores ou menores que zero, dependendo das sinapses serem inibitórias ou excitatórias. O neurônio dispara quando a soma dos impulsos que ele recebe ultrapassa o limiar de excitação. A ativação do neurônio é feita através da função de ativação que aciona ou não a saída, em função do valor da soma ponderada das entradas. (Braga, A .P. et al, 2000)

O neurônio artificial (elemento de computação) típico de uma rede neural é basicamente um elemento comparador, que ao verificar que o efeito cumulativo do sinal excede um valor limite, produz um determinado resultado (Patterson, 1996).

Associado a cada sinal de entrada  $x_i$  existem pesos  $w_i$  (amplitudes da ligação), que modelam o funcionamento das sinapses das redes biológicas, atuando de forma a aumentar ou diminuir o sinal de entrada (Freeman e Skapura, 1992), como mostra a figura 2.27.



**Figura 2.27: Esquema de um neurônio artificial (adaptado de Lippman, 1987).**

Pode-se modelar o funcionamento de um neurônio como a geração de um impulso de saída a partir da soma ponderada dos sinais que a ele chegam (equação 1).

$$y = f(w, x) \quad (5)$$

$$y = f(S_i) \quad (6)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j \quad (7)$$

Onde:

$x_i$  é o impulso de entrada;

$w_{ij}$  o peso atribuído a entrada  $j$  do neurônio  $i$ ;

$f$  função de transferência;

$n$  número de impulsos de entrada;

$y$  impulso de saída e

$S_i$  nível de ativação

Uma soma ponderada destes impulsos, através dos pesos  $w_{ij}$ , origina um valor de saída  $y=f(S_i)$ . Se este valor for muito pequeno, ele é desconsiderado, senão um impulso unitário é gerado e passado ao seguinte neurônio. Antes de ser utilizada para resolver problemas a RNA deve ser treinada, o que significa ajustar a sua matriz de pesos ( $W$ ) de forma a se adaptar aos dados de treinamento, buscando e reconhecendo padrões nos dados que permitam que posteriormente a rede possa associá-los às informações que devem ser fornecidas como resposta. As Redes neurais aprendem com a interação de padrões de exemplo, sem requererem um conhecimento das relações entre as variáveis sob investigação. Para isso, a rede precisa de um banco de dados de exemplos através dos quais ela possa extrair “conhecimento”, seja descobrindo relações “entrada x saída”, seja descobrindo similaridades entre os dados. (Ribeiro S. R. A., Centeno J. S., 2001).



### **2.3.2 – CLASSIFICAÇÃO DAS REDES**

Existem diversos tipos de redes neurais que diferenciam entre si principalmente por sua arquitetura (topologia da rede) e pelo tipo de aprendizado (ou treinamento).

Existem basicamente dois tipos de aprendizado: o supervisionado e o não-supervisionado. No primeiro, os exemplos (padrões de treinamento) fornecidos à RN são pares “entrada-saída”. Neste caso, a RN deve aprender um modelo que melhor represente tal relação “entrada x saída”. No aprendizado não-supervisionado, apenas entradas são fornecidas à RN e o aprendizado compreende a descoberta de agrupamentos (“clustering”) de dados, baseado em similaridades.

De acordo com Patterson (1996), com relação à sua arquitetura, as redes podem ser de uma única camada (Adaline, Perceptron, LVQ, SOFM, entre outras), multicamadas (MLP, MADALINE, RBF, GRNN, entre outras) ou recorrentes (ART, RNN, entre outras).

O tipo de rede neural mais popular é a MLP (*Multi Layer Perceptron*) com treinamento supervisionado (especificamente o algoritmo de retropropagação de erros, ou “*Backpropagation*”). Tal rede, assim como algumas outras arquiteturas de RN supervisionadas foram investigadas, tendo sido a GRNN a que apresentou os melhores resultados.

Desta forma, optou-se por detalhar apenas o tipo de rede neural utilizada neste estudo.

### **2.3.3 – REDE GRNN**

A rede GRNN (do inglês *General Regression Neural Network*) e constitui-se em uma variação da rede de base radial (*Radial Basis Function* - RBF), que é formada por uma camada de neurônios não-lineares cujas funções de ativação são do tipo gaussiana em vez de sigmoidais, sendo utilizada principalmente para aproximar funções ou relações. Por esta característica também pode ser utilizada como um classificador por semelhança. A arquitetura de uma rede GRNN pode ser visualizada na Figura 2.28.

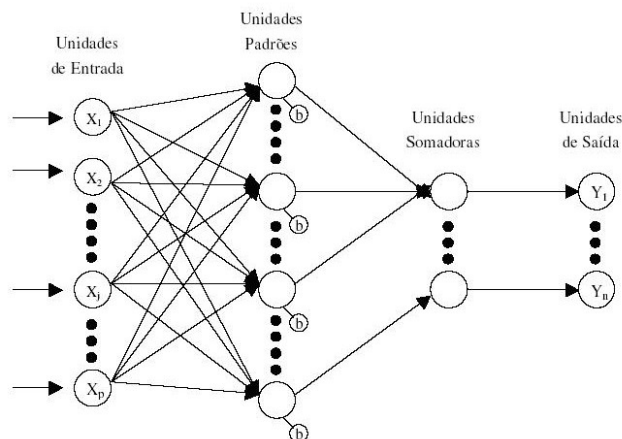


Figura 2.28: Arquitetura da rede neural do tipo GRNN (Morais D. R., Rolim J. G., 2004)

A GRNN é uma rede de treinamento supervisionado, usualmente com quatro camadas.

A camada de entrada é usada para normalizar os dados. A camada intermediária é composta pela quantidade de neurônios iguais ao do numero de conjuntos de dados de treinamento, onde cada neurônio processa os sinais recebidos, gerando uma saída (*feature*\*). Quanto mais o conjunto de dados de entrada for parecido com os dados de seu de treinamento, maior será a “feature” deste neurônio.

A camada de saída será a divisão do somatório das features dos neurônios relativos a cada saída com o somatório das features de todos os neurônios, efetuando uma normalização na saída da rede.

Após apresentar à rede os dados de treinamento, cada neurônio calcula a distância entre o vetor de entrada e o exemplo a ele associado. A distância obtida é multiplicada por um valor de *bias*\*\* e aplicada à função radial. Assim, quando a distância entre o vetor de pesos e o vetor de entrada for próximo a zero o valor de saída do neurônio será próximo a unidade. O valor do bias aplicado tem a finalidade de ampliar ou reduzir a área da função radial. Assim para cada neurônio é associado

\* A feature de um neurônio pode ser entendida como o grau de influência das informações deste neurônio nos neurônios subsequentes.

\*\* A camada de entrada possui um neurônio especial chamado de "bias" e serve para aumentar os graus de liberdade, permitindo uma melhor adaptação por parte da rede neural ao conhecimento à ela fornecido, aumentando ou diminuindo a entrada líquida da unidade, dependendo se o seu valor for positivo ou negativo, respectivamente.

um vetor peso, que pode ser visto como o centro de uma superfície Gaussiana no espaço multidimensional sendo ajustado seu raio pelo valor do bias.

O ajuste do parâmetro espalhamento (*spread*) é realizado de maneira heurística, sendo este geralmente um valor entre a mínima e máxima distância entre os vetores que correspondem aos padrões armazenados. Caso o parâmetro *spread* seja muito grande, várias unidades poderão ser excitadas quando uma entrada for apresentada à rede. Neste caso a rede apresenta uma capacidade de generalização demasiada. De outra forma, se o valor for muito pequeno implica em uma excitação única e exclusiva da unidade que possuir o exemplar mais próximo ao vetor apresentado à rede, sendo esta incapaz de generalizar. Um conjunto de dados é utilizado para treinamento da rede, outro conjunto é utilizado para a regulação do espalhamento e por fim são testados os dados em questão.

## 2.4 – A TRANSFORMADA DE FOURIER

A Transformada de Fourier é uma transformada integral que expressa uma função em termos de funções de base senoidal, isto é, como soma ou integral de funções senoidais multiplicadas por coeficientes ("amplitudes").

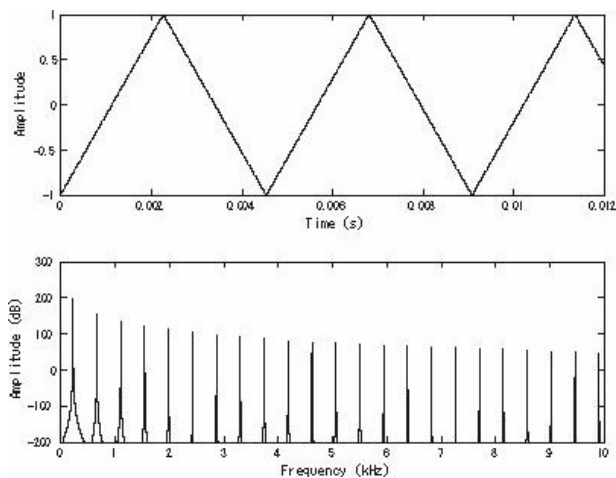
O espectro sonoro é a distribuição, no domínio das frequências, do conjunto de todas as ondas que formam os sons audíveis e não audíveis pelo ser humano. Em geral, os sons que ouvimos no dia a dia são sons complexos (compostos por diversas frequências) constituídos por parciais harmônicos e não harmônicos. O espectro de um som complexo caracteriza graficamente a forma da onda que o define, e está sempre presente ao distinguirmos uma voz, de um instrumento musical, e estes dois de um carro a buzinar, entre outras situações.

Matematicamente, representa-se o espectro sonoro como uma série de Fourier, uma função no domínio das frequências, em oposição à forma de onda que é uma função no domínio do tempo. Qualquer onda sonora, assim como qualquer outro fenômeno ondulatório, pode ser representado através de seu espectro, assim a transformada de Fourier fornece um "mapa" das frequências que compõem um sinal. Este tipo de "mapa" é utilizado em equipamentos eletrônicos, tais como analisadores de espectro ou em equalizadores, onde um gráfico de espectro sonoro, representa a amplitude das frequências que compõem o som analisado.

No caso de analisadores digitais, o cálculo é realizado através da Transformada Rápida de Fourier - FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*), um algoritmo bastante eficiente que permite calcular o valor de uma Transformada Discreta de Fourier – DFT (do inglês *Discret Fourier Transform*), em tempo real.

A Transformada de Fourier de uma função produz um espectro da função original que pode ser reconstruído por uma transformação inversa, o que a torna reversível. Para isso, ela preserva não só a amplitude da frequência de cada componente, mas também a sua fase. Em geral, nas representações gráficas apenas a magnitude de cada componente é mostrada.

Devido a reversibilidade, a transformada de Fourier é chamada de representação da função em termos de frequência, em vez de tempo, assim, é uma representação da função no domínio da frequência. A Figura 2.29 mostra uma forma de onda triangular no domínio do tempo e sua representação (Transformada) no domínio da frequência.



**Figura 2.29: Forma de onda triangular representada no domínio do tempo e no domínio da frequência (Transformada).**

A Transformada de Fourier de uma função que oscila, também é oscilatória, o que torna necessário que se faça algum tipo de média a fim de criar uma imagem clara da distribuição de frequência.

Uma abordagem matemática formal da Transformada de Fourier, DFT e FFT, pode ser vista no apêndice B.

### **2.4.1 – TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER**

A teoria da transformada de Fourier assume que a função é contínua com uma extensão infinita para qual a transformada é realizada. Porém, em casos práticos, normalmente a avaliação da transformada de Fourier não é feita utilizando os procedimentos analíticos. Muitas vezes não se dispõe de uma expressão analítica para a função que se deseja analisar o espectro.

A Transformada Discreta de Fourier (DFT) é muito útil no estudo do espectro de sinais para uso da Transformada de Fourier em computadores para aplicações científicas. Na DFT os dados são divididos em segmentos de tempo e a transformada é feita em cada um destes segmentos. Assim, a função que antes era contínua, passa a ter valores discretos, como pode ser visto na figura 2.30.

Desenvolve-se assim, a Transformada Discreta de Fourier – DFT (*Discret Fourier Transform*), que tem em sua implementação rápida (FFT) um eficiente

algoritmo para sua utilização, assim, ao invés do cálculo da DFT diretamente pela definição, faz-se uso da FFT (*Transformada Rápida de Fourier*) que permite avaliar a DFT com menor esforço computacional.

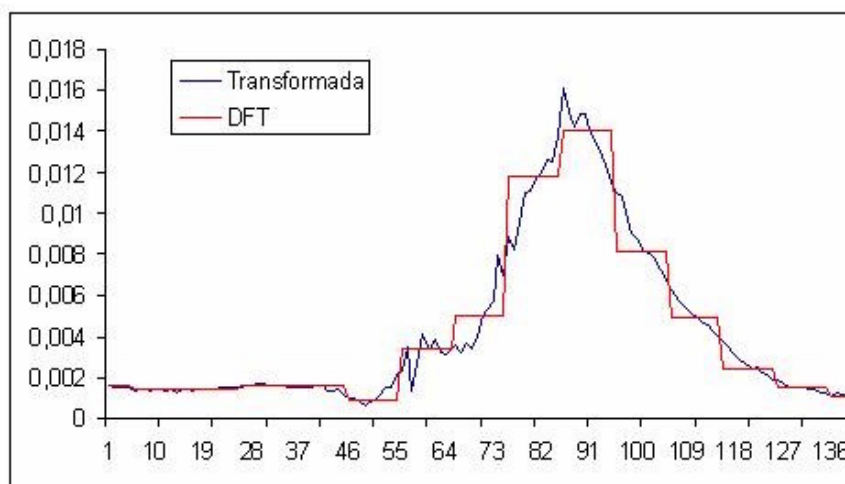


Figura 2.30: Gráfico mostrando a transformada de Fourier e uma possível discretização deste sinal (DFT).

## 2.4.2 – TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

A Transformada rápida de Fourier (em inglês *Fast Fourier Transform*, ou FFT) é um algoritmo eficiente para se calcular a Transformada Discreta de Fourier (DFT), e consiste numa implementação rápida da DFT, tirando partido da estrutura repetitiva do cálculo.

O sucesso da FFT deve-se, por um lado, ao vasto número de aplicações e por outro, à estrutura particular da DFT que faz com que a *matriz de transformação*\* possua uma grande redundância nos seus elementos, facilitando a sua implementação recursiva.

O principal ponto das implementações em FFT diz respeito ao fato de alguns termos serem computados uma vez e armazenados para serem usados em operações futuras, o que associado a algumas decomposições apropriadas podem

\* Pode-se escrever a DFT como o produto de uma matriz por um vetor, onde a matriz é chamada matriz de transformação e o vetor contém as amostras do sinal a transformar.

tornar o número de multiplicações e adições proporcionais a  $N \cdot \log_2 N$ , em contraposição a  $N^2$  necessários para o cálculo da DFT diretamente pela definição.

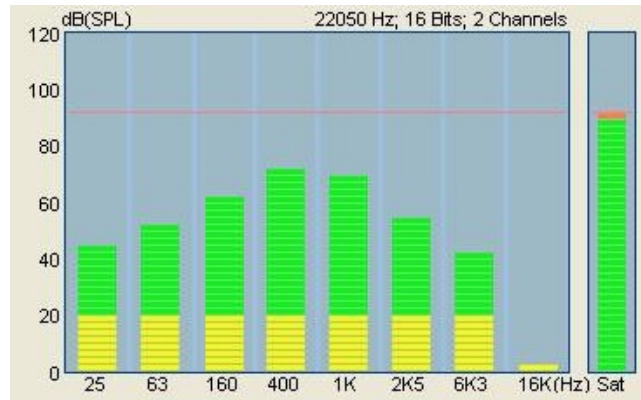
Assim, o número de multiplicações complexas e adições requeridas na implementação do algoritmo FFT é reduzido, tornando o método largamente utilizado para cálculos computacionais, pois possui complexidade reduzida e grande recursividade.

Logo, a FFT não é um tipo diferente de transformada e sim uma técnica que possibilita avaliar a DFT de forma mais rápida e exigindo menor recurso computacional. Isto pode ser verificado na tabela 2.4.

**Tabela 2.4: Vantagens do uso do algoritmo da FFT em relação ao cálculo da DFT diretamente pela definição.**

<b>N</b>	<b><math>N^2</math>(DFT)</b>	<b><math>N \cdot \log_2 N</math>(FFT)</b>	<b>Vantagem</b>
2	4	2	2
4	16	8	2
8	64	24	2,67
16	256	64	4
32	1024	160	6,4
64	4096	384	10,67
128	16384	896	18,29
256	65536	2048	32
512	262144	4068	56,89
1024	1048576	10240	102,4
2048	4194304	22528	186,18
4096	16777216	49512	341,33
8192	671088964	106496	630,15

No caso de equipamentos digitais, a FFT é muito utilizada para se criar analisadores de espectro ou equalizadores, onde um gráfico de espectro sonoro (geralmente composto por barras), representa em tempo real as amplitudes das freqüências que compõem o som analisado, como no esquema representado na figura 2.31.



**Figura 2.31: Esquema de equalizador usado em aparelhos de som convencionais; exemplo de aplicação da Transformada Rápida de Fourier.**



## **Capítulo 3 – A TÉCNICA PROPOSTA**

### **3.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS**

A utilização de técnicas ultra-sônicas em ensaios não destrutivos tem sido foco de muitas pesquisas em diversas áreas devido ao grande número de aplicações geradas pela sua eficiência e facilidade de implementação. Em sua grande maioria, estas técnicas utilizam-se de análises do pulso ultra-sônico no domínio do tempo, estudando os ecos ou a variação da velocidade do pulso ultra-sônico no material analisado. Estas técnicas são utilizadas para detecção de descontinuidades, defeitos e medidas não convencionais de tensões.

É possível, porém, a utilização de técnicas ultra-sônicas em aplicações não convencionais, como por exemplo na medida de porosidade de materiais. Assim, uma técnica já utilizada em ensaios não destrutivos para caracterização de materiais, baseia-se na variação da velocidade da onda ultra-sônica em função do meio em que se propaga. Desta forma, é analisada a variação do tempo de percurso da onda ultra-sônica em diversos corpos de prova com características conhecidas e tenta-se criar uma correlação entre a velocidade da onda e a própria variação da estrutura do material analisado.

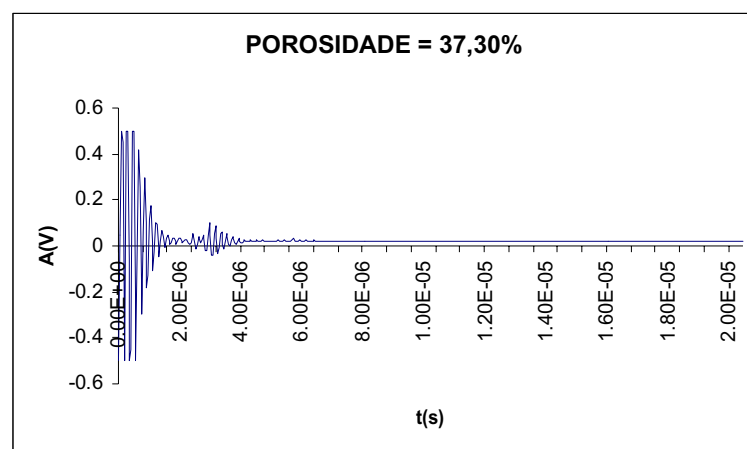
### **3.2 – OUTRAS TÉCNICAS DE MEDIDA DE POROSIDADE POR ULTRA-SOM**

Uma técnica ultra-sônica já utilizada para medida de porosidade (SANTOS J. G., et al., 1998; LAUX D., et al., 2002), consiste em se fazer medidas do tempo de percurso do pulso ultra-sônico em diversos corpos de prova com porosidade conhecida. Sabendo que a velocidade da onda ultra-sônica varia em função da porosidade, pode-se associar a velocidade do pulso ultra-sônico à porosidade do meio em que se propaga, criando uma correlação entre velocidade e porosidade.

Esta técnica apesar de simples e eficiente, possui algumas limitações. Um exemplo disto (figura 3.1) está em materiais com alta porosidade, onde a detecção do eco do pulso ultra-sônico, essencial para a determinação do tempo de percurso

da onda, se torna inviável devido a forte atenuação sofrida no material em função da presença de muitos vazios (poros).

É importante ressaltar que todas as figuras referentes as análises ultra-sônicas tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência utilizadas neste trabalho, foram realizadas no LABUS/IEN com o equipamento Explorer II descrito no Capítulo 4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, e com especificações detalhadas no APÊNDICE C.



**Figura 3.1: Pulso ultra-sônico fortemente atenuado devido à alta porosidade.**

Está técnica requer também uma informação adicional em sua análise, que é a medida da espessura do corpo analisado para que seja feito o cálculo da velocidade neste meio. Ainda relacionado a espessura do corpo de prova, existe uma dificuldade adicional, pois corpos de prova com pequenas espessuras podem apresentar superposição de ecos, impossibilitando a distinção entre dois ecos (Figura 3.2), não permitindo que seja feita a análise do tempo de percurso da onda ultra-sônica. Isto pode ainda ocorrer mesmo em corpos de prova onde a espessura não é pequena, mas para os quais a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico é muito alta. Assim, a relação entre a velocidade da onda ultra-sônica e a espessura do corpo de prova, estabelecem essa possibilidade ou não de realização da medida.

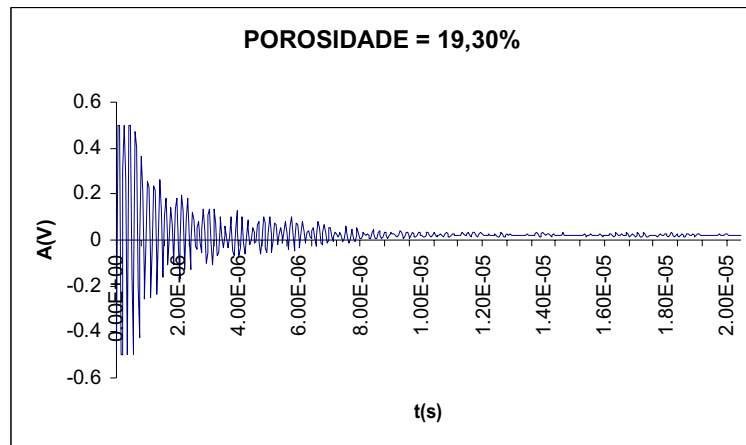


Figura 3.2: Ecos sobrepostos. Medidas feitas em uma pastilha de 5mm de espessura.

### 3.3 – A TÉCNICA DESENVOLVIDA

A técnica proposta neste trabalho inova ao analisar o espectro de frequência (FFT) do pulso ultra-sônico ou invés de seu tempo de percurso no material. Quando observado no domínio da frequência, é possível perceber como pulso ultra-sônico interage com a estrutura interna do material analisado alterando sua forma inicial em função destas interações. Depois de atravessar todo o material, de acordo com as interações sofridas o sinal é deformado de maneira única para cada tipo de estrutura interna (Figura 3.3).

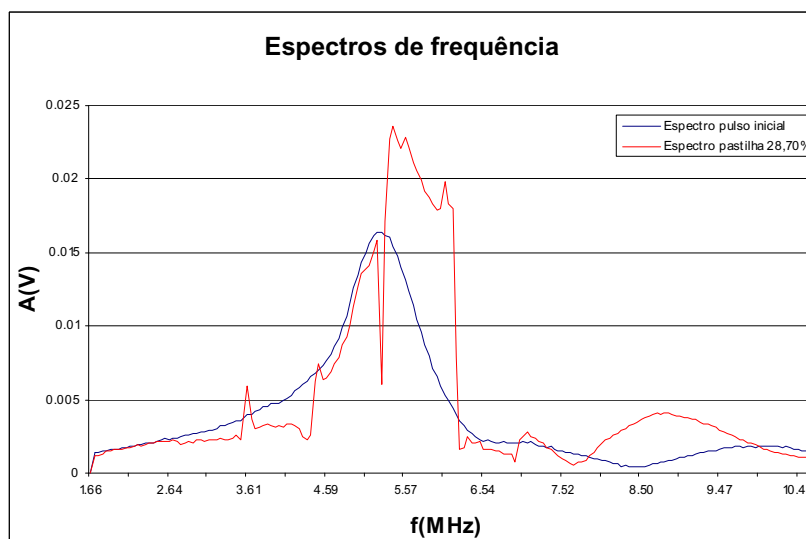
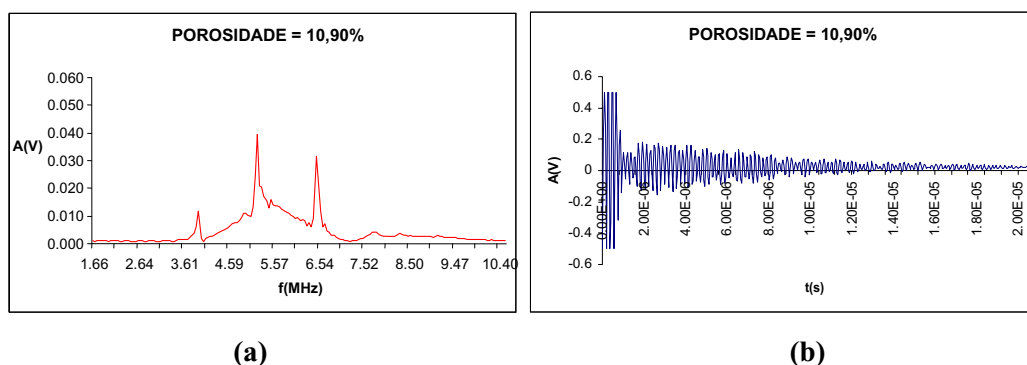


Figura 3.3: Espectro de frequência do pulso ultra-sônico de um transdutor de 5MHZ, antes (em azul) e depois de atravessar uma pastilha de 28,70% de porosidade (em vermelho).

Como visto no capítulo 1, sabe-se quais fenômenos são responsáveis pela deformação do pulso ultra-sônico ao atravessar o material analisado, porém não é objetivo deste estudo definir exatamente quais e em que proporções estes fenômenos estão ocorrendo. Para alcançar os objetivos definidos neste trabalho, basta que sejamos capazes de medir sinais que sofram variações que possam ser associadas às características que desejamos conhecer.

Assim, é proposto aqui outro trabalho para que seja dada continuação a este estudo onde se defina em detalhes todos os fenômenos envolvidos, fornecendo maior conhecimento sobre o comportamento do sinal ultra-sônico ao ser analisado no domínio da frequência, possibilitando aperfeiçoamentos na técnica proposta, como também a criação de novas ferramentas de análise que ofereçam recursos que permitam desenvolver sistemas cada vez mais especializados na caracterização de materiais.

Ao se analisar o pulso ultra-sônico no domínio da frequência, pode-se obter mais informações do material analisado se compararmos às técnicas que utilizam o domínio do tempo, pois o espectro de frequência fornece o grau de interação do pulso ultra-sônico de acordo com os fenômenos (dispersão, atenuação etc) ocorridos em função da estrutura do material. Assim, uma análise no domínio da frequência fornece informações que podem ser utilizadas para caracterizar melhor o material analisado sob diversos aspectos (porosidade, distribuição de tamanho de poros etc), funcionando como sua “impressão digital ultra-sônica”, diferentemente da análise feita no domínio do tempo onde tem-se reflexões (ecos) na superfície do material estudado (Figura 3.4).



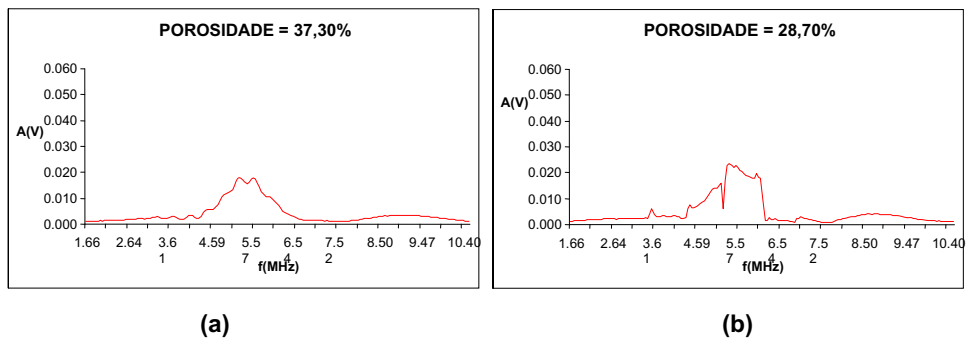
**Figura 3.4: Exemplo de sinais característicos de uma pastilha de porosidade de 10,90% no domínio da frequência (a) e no domínio do tempo (b).**

Analisando-se o espectro de frequência, tem-se também a vantagem da técnica, a princípio, não ser limitada pela pequena espessura do material analisado, como acontece ao se analisar o sinal no domínio do tempo, pois mesmo que os ecos do pulso ultra-sônico apresentem-se superpostos, dificultando ou até mesmo impedindo que sejam feitas medidas no domínio do tempo, este sinal ainda assim terá uma forma no domínio da frequência, a qual poderá ser associada a característica em estudo do material analisado. Isto torna a técnica proposta neste trabalho mais adequada para estudos de materiais com pouca espessura, nos quais a técnica que utiliza o domínio do tempo pode não fornecer bons resultados.

Outra vantagem é a de não estar limitada a medir apenas pequenas porosidades, pois não foram observadas dificuldades que impeçam que se realizem medidas em corpos de prova com elevados valores de porosidade. Para comprovar isto, neste trabalho foram utilizadas 40 pastilhas cerâmicas de alumina com porosidades variadas na faixa de 5,09% a 37,3%.

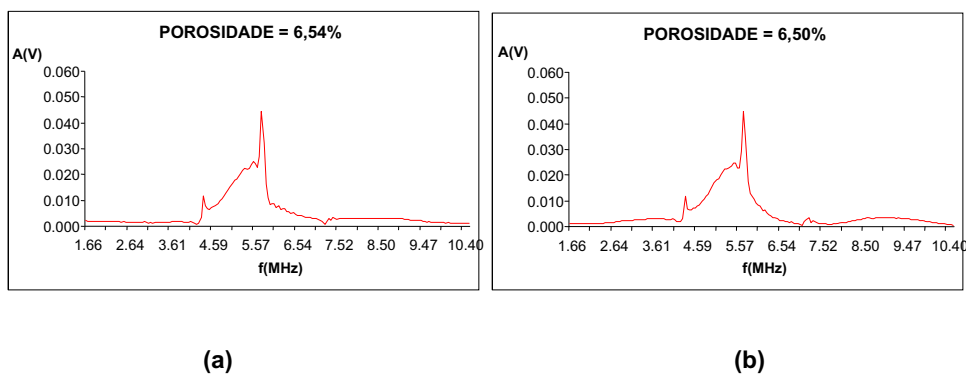
É importante ressaltar que a faixa de porosidade das pastilhas de Alumina utilizadas neste trabalho inclui os valores de porosidade utilizados nas pastilhas de  $UO_2$ , que é em torno de 10%, e que tanto as pastilhas de Alumina quanto as pastilhas de  $UO_2$  são cerâmicas o que confere características parecidas as duas. Com isto acredita-se que a técnica desenvolvida não precise de grandes mudanças e ajustes para que as medidas sejam feitas em pastilhas de  $UO_2$ .

Estudou-se então o espectro de frequência de todas as pastilhas e como esperava-se, o espectro era diferente para pastilhas com porosidades diferentes. Assim, pode-se associar a forma do espectro de frequência do pulso ultra-sônico obtido em uma pastilha a sua respectiva porosidade. Como mostra a figura 3.5, pastilhas com porosidades distintas possuem espectros de frequência com características bem definidas, podendo ser facilmente identificadas visualmente.



**Figura 3.5:** Em (a) tem-se um sinal característico das pastilhas de porosidade 37,30% e em (b) o sinal característico das pastilhas de porosidade 28,70%, que podem facilmente ser identificados.

Porém pastilhas com pequenas variações de porosidade possuem sinais muito parecidos (figura 3.6), não podendo ser distinguidas visualmente. Para que a distinção entre estes sinais possa ser feita, implementou-se um sistema de reconhecimento de sinais baseado em inteligência artificial. Desta forma, uma rede neural artificial será treinada e utilizada com o intuito tanto de fornecer a precisão necessária para a distinção de sinais de pastilhas com valores de porosidade muito próximos, como também para a automação do processo de reconhecimento de sinais.



**Figura 3.6:** Em (a) tem-se um sinal característico das pastilhas de porosidade 6,54% e em (b) o sinal característico das pastilhas de porosidade 6,50%, difíceis de serem distinguidos visualmente.

## Capítulo 4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 – PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Neste trabalho foram utilizadas 40 pastilhas cerâmicas de alumina, fabricadas em prensa uniaxial de ação simples utilizando matriz de dimensões 25x25mm, obtendo-se corpos de prova com aproximadamente 5mm de espessura, e podem ser visualizadas na Figura 4.1. Foram aplicadas duas pressões de compactação, 50 e 100Kgf/cm<sup>2</sup>. As sinterizações foram realizadas em forno resistivo nas temperaturas de 1150, 1400, 1480, 1540 e 1580°C por 1 hora, de modo a obter-se porosidades variáveis em função destas diferenças de pressão e temperatura de sinterização. As medidas de porosidade foram obtidas pela técnica de Archimedes, e seus valores estão apresentados na tabela 4.1.

**Tabela 4.1: Valores de porosidade de cada pastilha produzida, em função da pressão e temperatura de sinterização. Pode-se notar ligeira variação de porosidade para pastilhas produzidas com mesma pressão e temperatura de sinterização.**

ID	Pressão (MPa)	Temp. (°C)	Porosidade (%)
AA1	50	1480	37,30
AA2	50	1480	37,20
AA3	50	1480	37,20
AA4	50	1480	37,10
AA5	50	1480	36,80
AB1	50	1540	29,00
AB2	50	1540	28,70
AB3	50	1540	28,70
AB4	50	1540	28,70
AB5	50	1540	28,70
AC1	50	1580	21,40
AC2	50	1580	21,20
AC3	50	1580	21,20
AC4	50	1580	20,60
AC5	50	1580	20,60
BA1	100	1150	19,90
BA2	100	1150	19,70
BA3	100	1150	19,60
BA4	100	1150	19,40
BA5	100	1150	19,30

ID	Pressão (MPa)	Temp. (°C)	Porosidade (%)
BB1	100	1400	12,30
BB2	100	1400	11,90
BB3	100	1400	11,70
BB4	100	1400	11,10
BB5	100	1400	11,10
BC1	100	1480	10,90
BC2	100	1480	10,80
BC3	100	1480	10,60
BC4	100	1480	10,60
BC5	100	1480	10,50
BD1	100	1540	6,90
BD2	100	1540	6,54
BD3	100	1540	6,50
BD4	100	1540	5,93
BD5	100	1540	5,81
BE1	100	1580	5,67
BE2	100	1580	5,54
BE3	100	1580	5,43
BE4	100	1580	5,20
BE5	100	1580	5,09

Pode-se observar que mesmo para iguais condições de fabricação obteve-se pastilhas com porosidades ligeiramente diferentes, o que mostra a necessidade de se ter uma técnica de caracterização de materiais não destrutiva que sirva para controlar as características do material produzido, pois de acordo com o rigor exigido pela aplicação em relação às características dos materiais utilizados (porosidade, distribuição de tamanho de poros, homogeneidade etc), a utilização de técnicas não destrutivas seria a única maneira de assegurar com precisão as características reais do material utilizado.

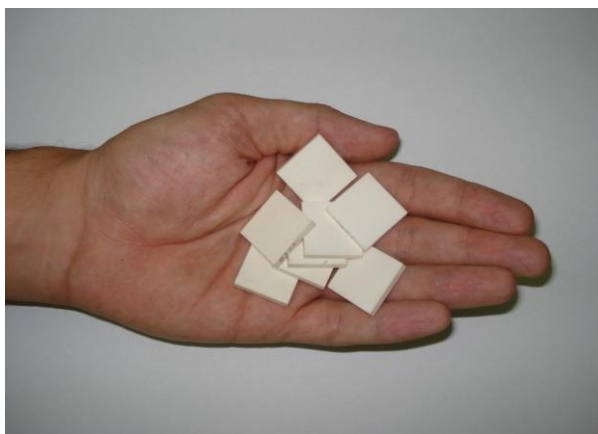


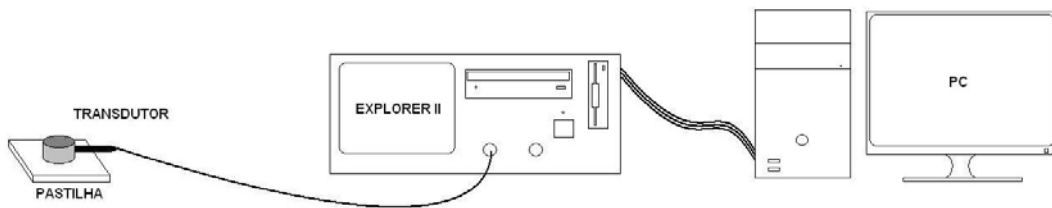
Figura 4.1: Foto de algumas das pastilhas utilizadas no trabalho.

#### **4.2 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

- Gerador e receptor de pulsos ultra-sônicos *EXPLORER II* da MATEC Instruments;
- 1 Computador IBM-PC;
- 1 Transdutor de ondas longitudinais de 5 MHz da marca Panametrics.

A montagem dos equipamentos segue o esquema ilustrado na Figura 4.2, e como pode-se ver é bastante simples, não envolvendo um grande número de equipamentos, nem grandes dificuldades relacionadas a montagem. Nesta técnica, utilizou-se o transdutor no modo pulso-eco. Assim, o equipamento *EXPLORER II* é responsável tanto pela geração quanto pela aquisição do pulso ultra-sônico. A análise é feita utilizando-se outro computador. Este arranjo é mostrado na fotografia apresentada na Figura 4.3.





**Figura 4.2: Esquema de montagem dos equipamentos utilizados**

Com este sistema, fez-se 50 medidas do espectro de frequência do pulso ultra-sônico para cada pastilha num total de 40 pastilhas (resultando em 2000 medidas), para gerar um banco de dados de sinais de cada pastilha com suas respectivas porosidades.



**Figura 4.3: Visão geral dos equipamentos utilizados.**

Na Figura 4.3, na parte inferior à direita, pode-se ver o computador utilizado para se fazer a análise dos sinais. Na parte superior esquerda tem-se o Explorer II e abaixo dele observa-se um segundo monitor, o qual foi utilizado somente para melhorar a visualização do sinal, pois o próprio Explorer II já possui um monitor para sua utilização, porém de pequenas dimensões, como visualizado na figura 4.4.



**Figura 4.4: Equipamento Explorer II da MATEC Instruments.**

O Explorer II apesar de não parecer, internamente é um computador com estrutura convencional (placa-mãe, processador, memória etc).

Ele funciona com um processador Intel Pentium II de 233 MHz e 64 Mb de memória RAM. O sistema operacional utilizado é o Windows 95, e o software utilizado para a aquisição de dados é o MUIS 32 também da Matec Instruments. Na figura 4.4 pode-se notar que ele possui também periféricos convencionais como CD-ROM e drive de disquete 3'5 (1,44 Mb).

Possui ainda, duas placas: uma TB1000 da *MATEC Instruments* (Figura 4.5) responsável pela geração do sinal ultra-sônico; e outra STR8100D da *SONIX* (Figura 4.6) que faz a aquisição do sinal, ambas com barramento ISA.

Especificações e características detalhadas do Explorer II podem ser vistas no Apêndice C.



Figura 4.5: Foto da placa geradora de sinal ultra-sônico TB1000.



Figura 4.6: Foto da placa de aquisição de sinal ultra-sônico STR8100D.

Depois de medir o espectro de frequência, este era enviado para um segundo computador responsável por todo o processo de análise de dados. Este segundo computador (Figura 4.7) possui um processador Intel Pentium IV Dual de 3,06 GHz com 1 GHz de memória RAM, fornecendo recursos computacionais mais que suficientes para a aplicação proposta.



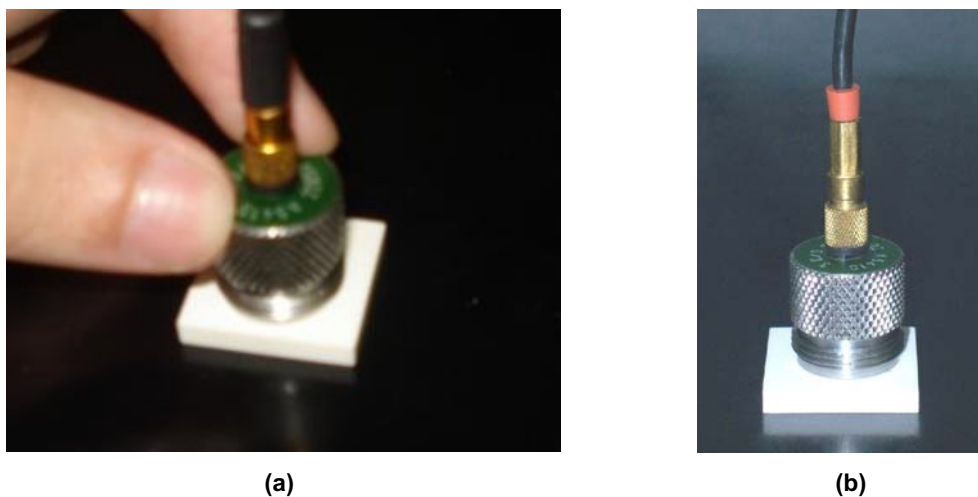
**Figura 4.7: Foto do computador utilizado para análise de sinais.**

Este segundo computador foi necessário devido às restrições de hardware e software observadas no Explorer II, que possui pouco poder de processamento e memória. E o fato das placas TB1000 e SR8100 possuírem barramento ISA, não permitia que estas fossem instaladas neste segundo computador que possui apenas barramentos PCI, e ainda que fossem instaladas haveria o problema do software MUIS32 só funcionar bem com o sistema operacional Windows 95, o qual não é compatível com alguns softwares utilizados para análise do sinal.

Diante destas dificuldades técnicas, o Explorer II foi utilizado como equipamento “*slave*”, sendo responsável somente pela geração e aquisição do pulso ultra-sônico, abastecendo o segundo computador, que foi utilizado em todas as etapas restantes de processamento e análise de dados.

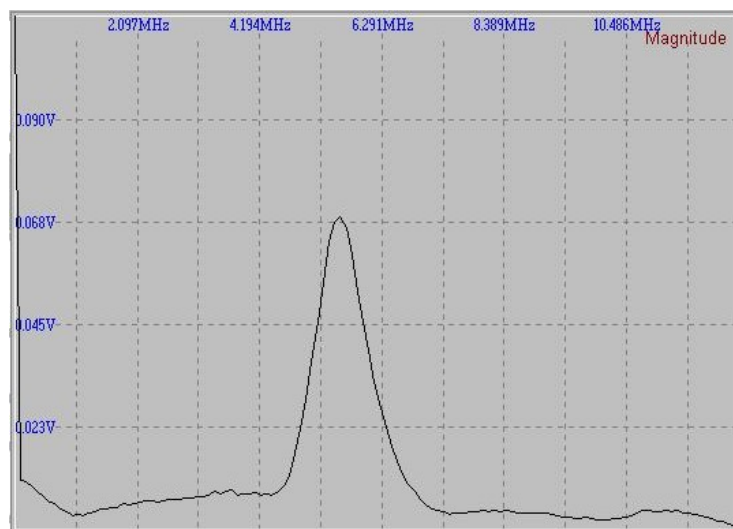
Para a geração do pulso ultra-sônico, utilizou-se um transdutor de contato (Figura 4.8) de onda longitudinal de 5 MHz e 0,5” de diâmetro, da marca Panametrics no modo pulso-eco. O acoplamento entre o transdutor e as pastilhas foi feito utilizando-se vaselina, o que por ser pouco viscosa faz com que o sinal não sofra muitas variações em função da pressão exercida sobre o transdutor. Isto foi verificado variando-se a pressão sobre o transdutor e observando-se que isto não resultava em mudanças significativas no sinal ultra-sônico, já que depois de colocado sobre a pastilha, uma pequena pressão exercida com os dedos sobre o

transdutor já era suficiente para que se estabelecesse uma camada mínima de vaselina entre a pastilha e o transdutor, não podendo ser alterada com o aumento de pressão. Assim, a amplitude do sinal se mantinha praticamente constante ao se tentar aumentar a pressão sobre o transdutor.



**Figura 4.8: Transdutor Panametrics sendo acoplado a uma das pastilhas durante o processo de medidas.**

A curva de frequência deste transdutor gerada pelo Explorer II através do software MUIS32 pode ser visualizada na figura 4.9.



**Figura 4.9: Curva de frequência do transdutor utilizado neste trabalho, gerada pelo software MUIS32.**

### 4.3 – METODOLOGIA

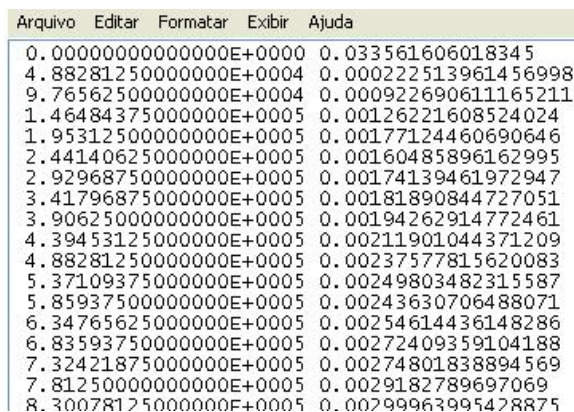
Nesta seção descreve-se toda a metodologia utilizada no trabalho, desde os processos adotados na etapa de medidas até os procedimentos envolvidos na análise e manipulação de dados para a criação do arquivo necessário ao treinamento da rede neural utilizada.

#### 4.3.1 – METODOLOGIA DE MEDIDAS

O software MUIS32 possui a opção de FFT em tempo real do pulso ultra-sônico, possibilitando a visualização do pulso ultra-sônico tanto no domínio do tempo como também no domínio da frequência, mostrando o espectro de frequência do pulso depois de atravessar a pastilhas e retornar ao transdutor. Nesta etapa de medidas, não adotou-se nenhum procedimento especial diferente dos comumente utilizados em qualquer medida ultra-sônica com transdutores de ondas longitudinais.

Porém como o espectro de frequência oscila um pouco em função da própria natureza da onda ultra-sônica, da precisão do equipamento e do acoplamento do transdutor, fez-se a aquisição de 50 sinais ultra-sônicos no domínio da frequência em cada pastilha, para que posteriormente fossem feitas médias destes sinais com o intuito de dar maior estabilidade ao espectro analisado.

O software MUIS32 gera um arquivo para cada um dos espectros capturados, os quais possuem a extensão .DAT, onde as informações estão salvas no formato somente texto em colunas separadas por espaços, como mostrado na figura 4.10.

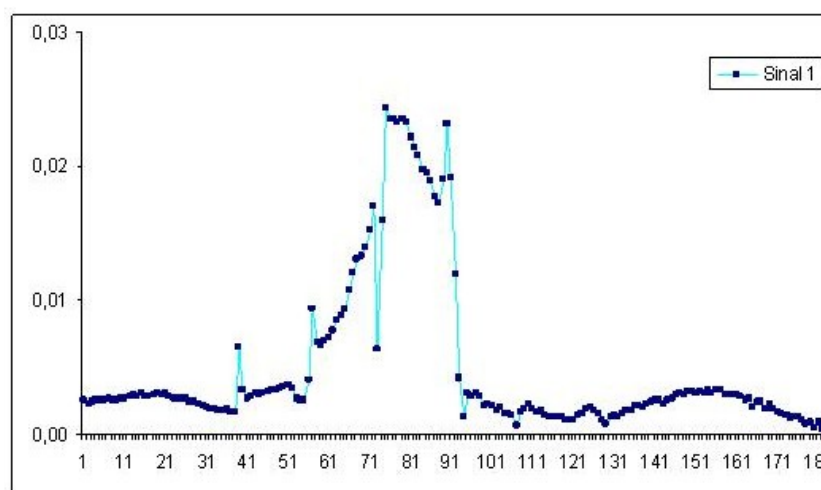


Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
0.0000000000000000E+0000	0.033561606018345			
4.8828125000000000E+0004	0.000222513961456998			
9.7656250000000000E+0004	0.000922690611165211			
1.4648437500000000E+0005	0.00126221608524024			
1.9531250000000000E+0005	0.00177124460690646			
2.4414062500000000E+0005	0.00160485896162995			
2.9296875000000000E+0005	0.00174139461972947			
3.4179687500000000E+0005	0.00181890844727051			
3.9062500000000000E+0005	0.00194262914772461			
4.3945312500000000E+0005	0.00211901044371209			
4.8828125000000000E+0005	0.00237577815620083			
5.3710937500000000E+0005	0.00249803482315587			
5.8593750000000000E+0005	0.00243630706488071			
6.3476562500000000E+0005	0.00254614436148286			
6.8359375000000000E+0005	0.00272409359104188			
7.3242187500000000E+0005	0.00274801838894569			
7.8125000000000000E+0005	0.0029182789697069			
8.3007812500000000E+0005	0.00299963995428875			

Figura 4.10: Arquivo gerado pelo MUIS32 aberto em um software de edição de texto.



Na figura 4.10 pode-se visualizar um trecho de um arquivo gerado pelo MUIS32, onde a primeira coluna representa as freqüências e a segunda o valor da amplitude referente a cada freqüência. Cada linha representa um ponto discretizado no gráfico que mostra o espectro de freqüência. Utilizou-se 256 pontos para discretizar o espectro analisado (Figura 4.11) pois devido às características intrínsecas ao cálculo da FFT o número de pontos deve ser sempre uma potência de 2. Porém como será mostrado, o número de pontos dos sinais será reduzido durante o processo de análise.



**Figura 4.11: Pontos discretos no espectro de freqüência da pastilha BB2 (Porosidade igual a 28,70%).**

#### **4.3.2 – METODOLOGIA DE ANÁLISE**

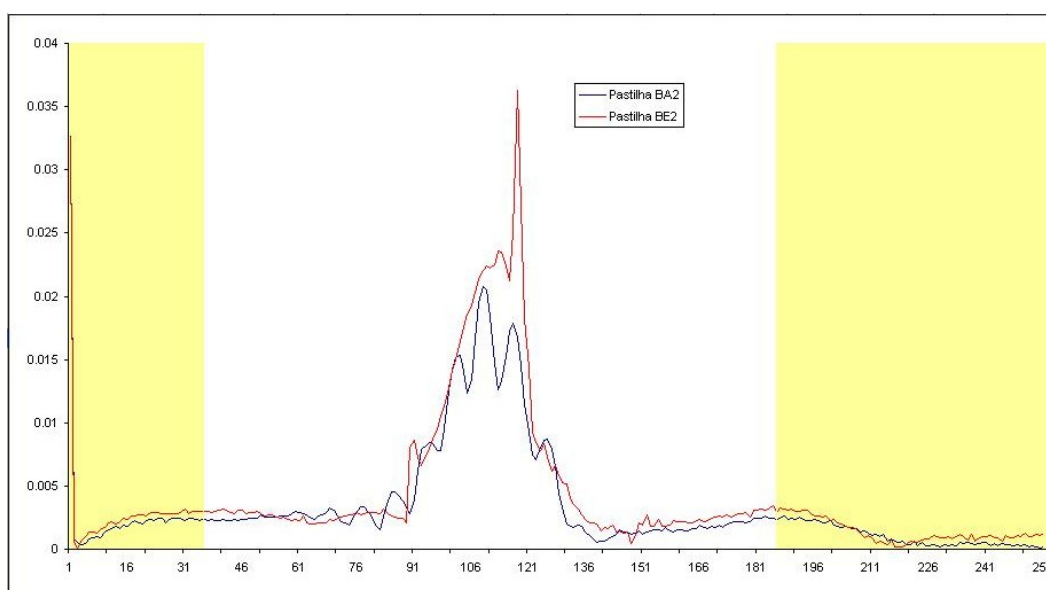
Esta etapa consiste basicamente no processo de tratamento de dados visando a elaboração do arquivo com as informações necessárias ao treinamento da rede neural utilizada. A etapa de elaboração deste arquivo é a que envolve maior número de procedimentos e cuidados, pois o sucesso desta técnica está diretamente relacionado ao número e a qualidade das informações contidas neste arquivo.

O primeiro procedimento realizado é o da conversão do arquivo .DAT gerado para cada sinal, em um arquivo que possa ser aberto por um programa onde estes arquivos possam ser manipulados, o que pode ser facilmente realizado por qualquer editor de planilhas como o Excell, SPSS, Origin, Estatística etc. A única dificuldade desta etapa é o número de arquivos a serem convertidos, pois fazendo 50 medidas

em cada pastilha num total de 40 pastilhas, tem-se ao final da etapa de medidas 2000 arquivos.

Outro procedimento adotado foi devido a observação de que a parte inicial (de 0 a 1,61 MHz) e a parte final (10,69 a 12,45 MHz) do espectro de frequência de pastilhas com porosidades diferentes, não possuíam diferenças significativas quando comparados com outras faixas de frequência destes espectros (Figura 4.12), pois como o esperado, as maiores diferenças na forma dos espectros de duas pastilhas diferentes ocorre na faixa de frequência de operação do transdutor utilizado (faixa de maior amplitude).

Assim, com o intuito de abastecer a rede somente com informações que possam ser utilizadas no processo de distinção dos sinais, evitando informação redundante, eliminou-se parte dos espectros de frequência, reduzindo o número total de pontos discretizados de 256 para 185 pontos. Este valor foi obtido empiricamente devido a retirada dos 34 primeiros pontos (referentes a faixa de 0 a 1,61 MHz) e dos 37 (referentes a faixa de 10,69 a 12,45 MHz ) últimos pontos de cada gráfico, os quais pode-se observar que se mantinham praticamente constantes em todos os espectros medidos. Isto pode ser visto na Figura 4.12, que mostra o espectro de frequência das pastilhas BA2 (porosidade igual a 37,20%) e BE2 (porosidade igual a 5,54%).

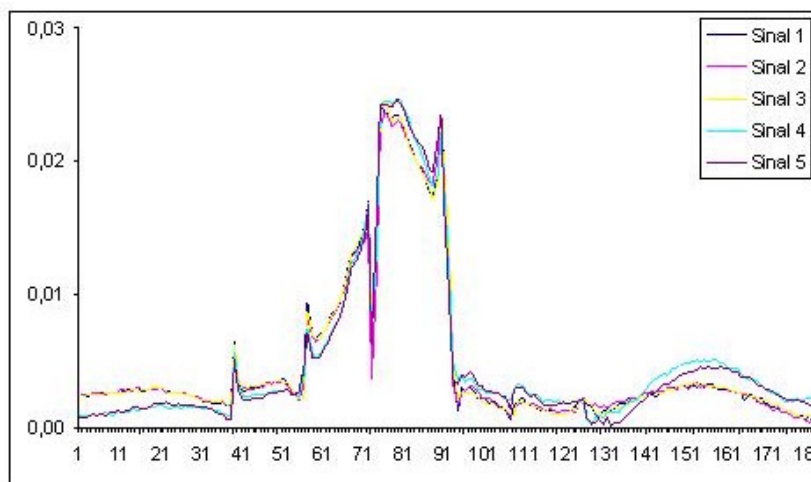


**Figura 4.12:** Em amarelo as faixas do espectro de frequência que foram excluídas.



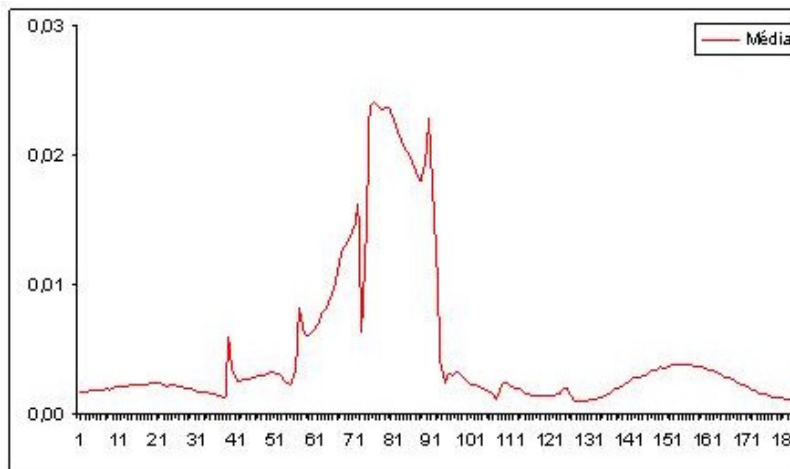
Nesta figura as faixas excluídas são exibidas em amarelo, e pode-se observar que nestas faixas, o espectro de pastilhas com porosidades diferentes, mostram-se praticamente iguais. Logo esta parte foi excluída por não conter informação que auxilie na distinção de espectros referentes a pastilhas com porosidades diferentes e por facilitar o processamento dos sinais.

Este procedimento foi adotado devido a própria estrutura de cálculo da FFT só permitir que seja usado um número de pontos que seja resultado de uma potência de 2. Ao utilizar 128 pontos, observou-se que parte da informação era perdida, e seguindo o critério de cálculo da FFT, a próxima opção para o número de pontos discretizados é 256, que foi a opção escolhida. Estes números e a vantagem do uso da FFT em relação ao cálculo da DFT pela definição podem ser vistos na tabela 2.4. Depois da conversão de arquivos, seguiu-se com a etapa de criação de médias a cada 5 sinais, ou seja, com 50 sinais para cada pastilhas, fez-se a média a cada 5 sinais (Figura 4.13), criando 10 médias de sinais para cada pastilha, como mostra a figura 4.14.



**Figura 4.13: Cinco primeiros sinais referentes a pastilha BB2 (Porosidade igual a 28,70%).**

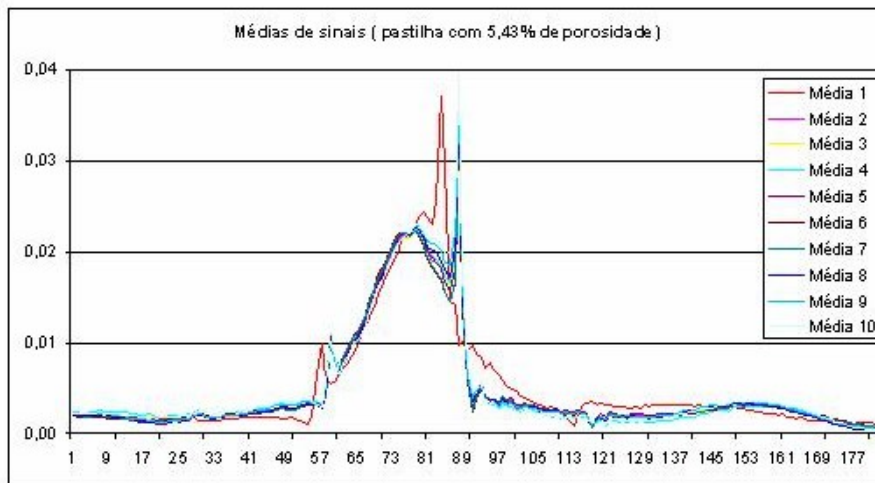
Estas médias são feitas ponto a ponto, utilizando os valores discretizados em cada sinal. Assim, soma-se o primeiro ponto de cada um dos cinco sinais e divide-se por cinco gerando o primeiro ponto do sinal médio, em seguida repete-se o mesmo processo para o segundo ponto de todos os cinco sinais, e assim por diante até os últimos pontos, finalizando o processo e criando um gráfico que é a média de outros cinco.



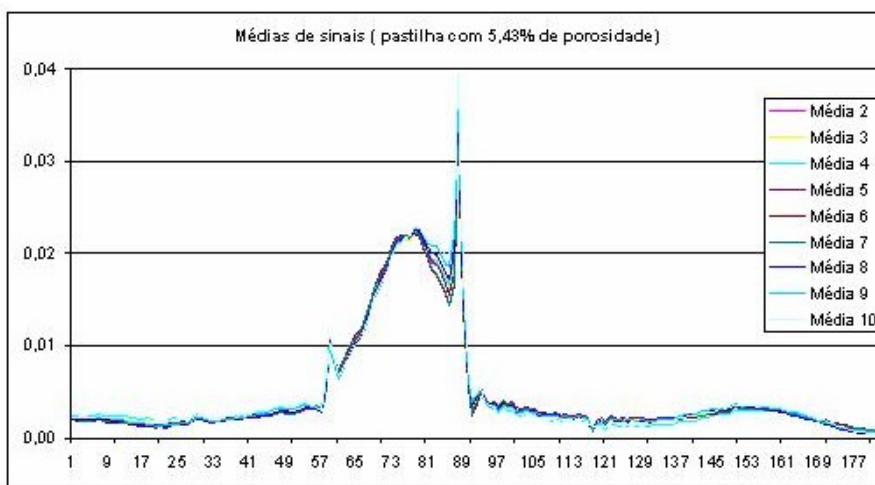
**Figura 4.14: Média dos cinco primeiros sinais referentes a pastilha BB2 (Porosidade igual a 28,70%).**

Em seguida, criou-se um parâmetro chamado de “Fator Q”. Este parâmetro foi utilizado para classificar individualmente as médias dos sinais em uma pastilha em relação a tendência geral de todas as médias calculadas na pastilha em questão, já que todos os sinais de uma mesma pastilha tendem a ter a mesma forma, porém com pequenas variações. Como não se tem um padrão ideal e absoluto de sinal para ser utilizado como referência para se comparar com as médias calculadas, e saber quais podem ser utilizados e quais devem ser rejeitadas, adotou-se o seguinte procedimento: todos os sinais das pastilhas eram sobrepostos; com isso consegue-se visualizar a tendência geral destes sinais. Aos sinais que mantinham essa tendência geral era atribuído o valor “1” ao seu “Fator Q”. Os sinais que fugiam muito a essa tendência recebiam o valor “0”. Os sinais que não seguiam perfeitamente a mesma tendência dos demais, porém não apresentavam grandes distorções em relação à tendência geral dos demais, recebiam o valor “0,5”. Assim, este parâmetro serviu para avaliar a qualidade (neste caso qualidade está se referindo à semelhança dos sinais de uma mesma pastilha) dos sinais, já que para o treinamento da rede não basta que se tenham muitas amostras, é necessário ainda que estas possuam informação de qualidade. Devido à falta de um método ou ferramenta estatística para este tipo de análise, este procedimento foi uma avaliação puramente visual, porém como mostrado na figura 4.15 e 4.16, neste caso uma análise visual pode ser bastante aceitável.

Com isto fez-se dois experimentos: no primeiro a rede foi treinada com todos os sinais independente de seus fatores “Q”. Para o segundo treinamento retirou-se todos os sinais que tinham fator Q diferentes de 1. No Capítulo 5, mostra-se os resultados destes dois experimentos. Como a precisão obtida pela rede foi maior no treinamento em que se mantém somente os sinais com fator Q iguais a 1, adotou-se na metodologia de análise o procedimento de rejeitar todos os sinais com fator Q diferentes de 1. Este procedimento pode ser melhor entendido ao se analisar a figura 4.15 onde tem-se todas as médias de sinais da pastilha BE3, e compará-la com a figura 4.16 que mostra os sinais da mesma pastilha porém sem a média 1, ao qual foi atribuída um fator Q igual a zero por não representar a tendência geral dos outros sinais.



**Figura 4.15: Todas as médias de sinais que caracterizam a pastilha BE3.**



**Figura 4.16: Espectro mais bem definido após a retirada da média 1.**

Em seguida, de posse das 10 médias de sinais para cada pastilha e seus correspondentes valores de porosidade previamente medidos pela técnica de Arquimedes, criou-se uma planilha reunindo todas estas informações em um só arquivo, com a estrutura mostrada na Figura 4.17.

ID	Fator Q	Porosidade (%)	SINAL (média)	A1	A2	...	A184	A185
TR	1	19,30	1	0,00075389	0,00083763	...	0,00081308	0,00086345
TR	1	19,30	2	0,00104684	0,00104866	...	0,00107651	0,00105658
TR	1	19,30	3	0,00097241	0,00093687	...	0,00091183	0,00095957
TR	1	19,30	4	0,00067145	0,00081271	...	0,00076795	0,00074223
TR	1	19,30	5	0,00124638	0,00128940	...	0,00129055	0,00128886
TE	1	19,30	6	0,00101462	0,00107308	...	0,00109965	0,00108405
TE	1	19,30	7	0,00080921	0,00080234	...	0,00085597	0,00088115
TE	1	19,30	8	0,00077163	0,00085075	...	0,00084894	0,00087284
NA	1	19,30	9	0,00109690	0,00113762	...	0,00128520	0,00127090
NA	1	19,30	10	0,00118788	0,00126574	...	0,00132717	0,00126559

**Figura 4.17: Estrutura do arquivo utilizado para treinamento da rede.**

Nesta estrutura adotada, cada linha corresponde a um sinal e suas respectivas características. A coluna “ID” serve para que se identifique qual a função do sinal contido naquela linha. “TR” é o código utilizado para os sinais de treinamento, “TE” para sinais de teste. Durante a etapa de treinamento, a rede não utilizava os sinais com código “NA”. Os sinais do grupo NA foram utilizados depois de finalizado o processo de treinamento, em uma etapa de validação de suas capacidades de caracterização de sinais. Estes sinais serviam para saber se a rede seria capaz de produzir bons resultados para dados novos, os quais ela não teve acesso durante o processo de treinamento. A finalidade do grupo de sinais “NA”, é atribuir maior segurança e confiabilidade aos resultados obtidos.

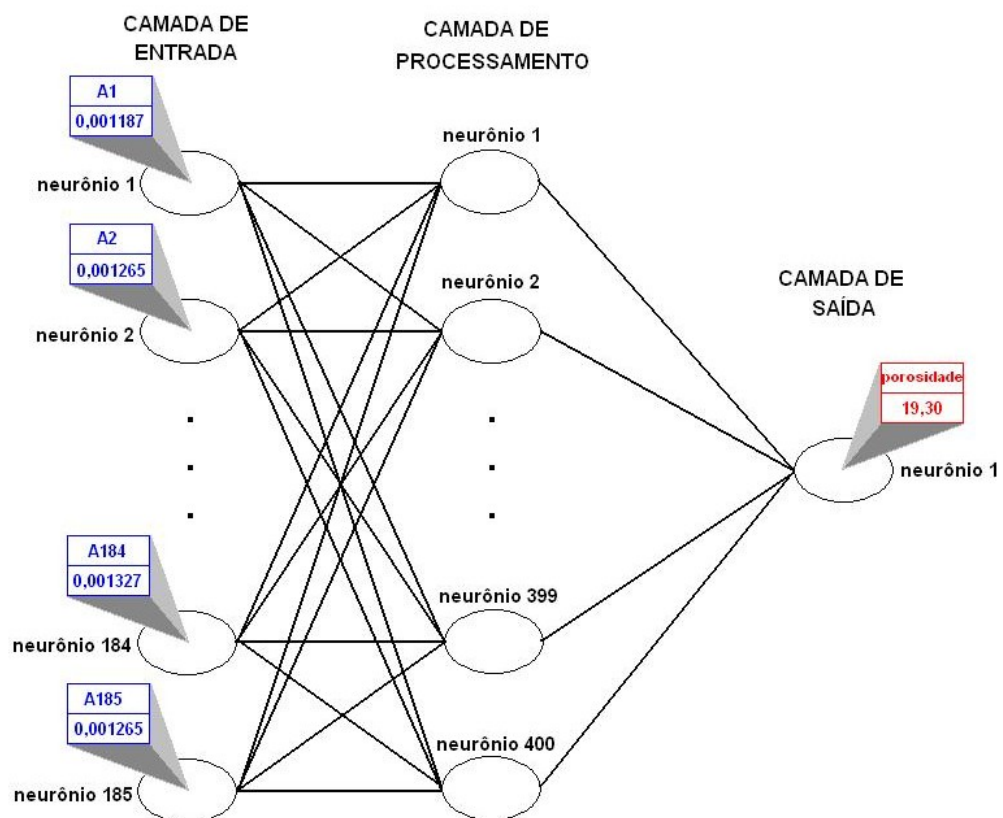
A segunda coluna era constituída pelo Fator Q de cada sinal, já anteriormente mencionado. A terceira coluna trazia o valor de porosidade correspondente ao sinal daquela linha, que era o valor de saída desejado. A quarta coluna servia para que se pudesse identificar a seqüência de médias de uma mesma pastilha. As colunas seguintes trazem as amplitudes de cada ponto do sinal discretizado, variando de A1 até A185, que eram os dados de entrada fornecidos à rede

A planilha utilizada para o treinamento da rede, possuía 400 linhas (cada uma referente a um sinal, como já mencionado) e 189 colunas (185 ocupadas pelo sinal, e 4 com as informações necessárias ao treinamento da rede).

A última etapa consistiu na implementação da rede neural. Diversos softwares permitem a implementação de redes neurais artificiais, como o Maple,

MatLab, Estatística etc. Diversos tipos de redes foram investigadas, e de acordo com os resultados obtidos, optou-se por utilizar a GRNN, que forneceu precisão bastante superior as outras redes nesta aplicação.

A estrutura da rede já particularizada para esta aplicação pode ser vista na figura 4.18. A rede possuía 185 neurônios na camada de entrada, um para cada ponto discretizado ( $A_1, A_2, \dots, A_{184}, A_{185}$ ) dos sinais. A camada de processamento era composta por 400 neurônios que foi definido em relação ao número total de sinais. Como a saída desejada era apenas o valor de porosidade referente aquele sinal, a camada de saída era formada por apenas um neurônio, que fornecia este valor.



**Figura 4.18:** Esquema da estrutura da rede com valores de entrada e saída referentes a uma pastilha de porosidade igual a 19,30%.

Com poucos minutos de treinamento a rede neural convergiu para resultados bastante satisfatórios, conseguindo distinguir com extrema precisão os sinais fornecidos, possibilitando a caracterização das pastilhas com eficiência e rapidez.

Realizou-se alguns testes para verificar a capacidade de interpolação da rede, o que criaria a possibilidade de caracterizar pastilhas com valores de porosidades intermediários aos padrões utilizados no treinamento da rede, aumentando ainda mais sua capacidade de caracterização. Porém estes resultados não foram satisfatórios, e uma discussão melhor sobre isto é feita no capítulo 5.

## Capítulo 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 – RESULTADOS OBTIDOS

Como mencionado no capítulo anterior, realizou-se dois treinamentos da rede. No primeiro, a rede foi treinada com todos os 400 sinais (10 sinais médios x 40 pastilhas). A tabela 5.1 mostra um resumo dos resultados deste primeiro treinamento

Tabela 5.1: Resumo dos resultados do primeiro treinamento.

$R^2$ *	0,9989
$r^2$	0,9998
Erro médio quadrado	0,00
Erro médio absoluto	0,00
Mínimo erro absoluto	0,00
Máximo erro absoluto	0,70
Coefficiente de correlação r	0,9999
Percentual de erro menor que 5%	99,25%
Percentual de erro de 5% a 10%	0,50%
Percentual de erro de 10% a 20%	0,25%
Percentual de erro de 20% a 30%	0,00%
Percentual de erro maior que 30%	0,00%

Este treinamento mostrou resultados razoáveis, pois dos 400 sinais utilizados a rede conseguiu caracterizar com perfeição (0% de erro) a porosidade de 372 amostras. E mesmo nos sinais onde houve erro, este em sua maioria não chega a 5%.

---

\* O coeficiente de determinação múltipla  $R$  é um indicador estatístico geralmente utilizado em regressão múltipla. Ele compara a precisão do modelo com a precisão de um modelo de referência onde a previsão é feita somente através da média de todas as amostras. Quanto mais perfeito o ajuste, mais o valor de  $R^2$  se aproxima de 1, em contrapartida um valor próximo de 0 é o resultado de um ajuste ruim.

A tabela 5.2 mostra os valores de porosidade encontrados pela rede neural dos 28 sinais onde houve erro na caracterização em relação aos valores previamente obtidos pela técnica de Arquimedes.

**Tabela 5.2: Resultados do primeiro treinamento (apenas os resultados com erro diferente de zero).**

ID	Arquimedes (%)	RNA(%)	Arquimedes-RNA (erro absoluto)	Erro percentual
TR	28,70	28,73	-0,03	0,10
TE	19,70	20,40	-0,70	3,54
TR	12,30	12,23	0,07	0,53
TE	11,10	11,11	-0,01	0,09
NA	11,10	11,16	-0,06	0,51
NA	10,50	10,64	-0,14	1,34
TE	6,54	6,53	0,01	0,16
NA	6,54	6,53	0,01	0,09
NA	6,50	5,80	0,70	10,73
TR	5,93	5,91	0,02	0,39
TE	5,93	5,92	0,01	0,09
NA	5,93	5,91	0,02	0,32
NA	5,67	5,69	-0,02	0,37
TR	5,81	5,79	0,02	0,40
TR	5,81	5,82	-0,01	0,10
NA	5,81	5,78	0,03	0,47
TR	5,54	5,37	0,17	3,06
TR	5,43	5,54	-0,11	2,07
TR	5,43	5,80	-0,37	6,82
TR	5,43	5,63	-0,20	3,65
TR	5,43	5,81	-0,38	7,05
TE	5,43	5,51	-0,08	1,55
TE	5,43	5,68	-0,25	4,59
TE	5,43	5,62	-0,19	3,58
NA	5,43	5,47	-0,04	0,74
TR	5,20	5,37	-0,17	3,26
TR	5,20	5,23	-0,03	0,51
NA	5,20	5,43	-0,23	4,40

No segundo treinamento realizado, retirou-se todos os sinais que possuíam fator Q diferente de 1. Com isto, pretende-se aumentar a precisão da rede durante o processo de caracterização de pastilhas, pois já que este fator Q mede o grau de semelhança de cada sinal em relação a tendência geral dos sinais em uma



determinada pastilha, acredita-se que mantendo somente os sinais que seguem bem esta tendência geral, possa levar a um aprendizado mais consistente da rede. No total foram retirados 18 sinais (14 com Fator Q igual a 0,5 e 4 com Fator Q igual a 0)

Com isto conseguiu-se uma precisão ainda melhor em relação ao treinamento anterior, caracterizando com perfeição todos os 380 sinais restantes.

O resumo dos resultados deste treinamento é mostrado na tabela 5.3.

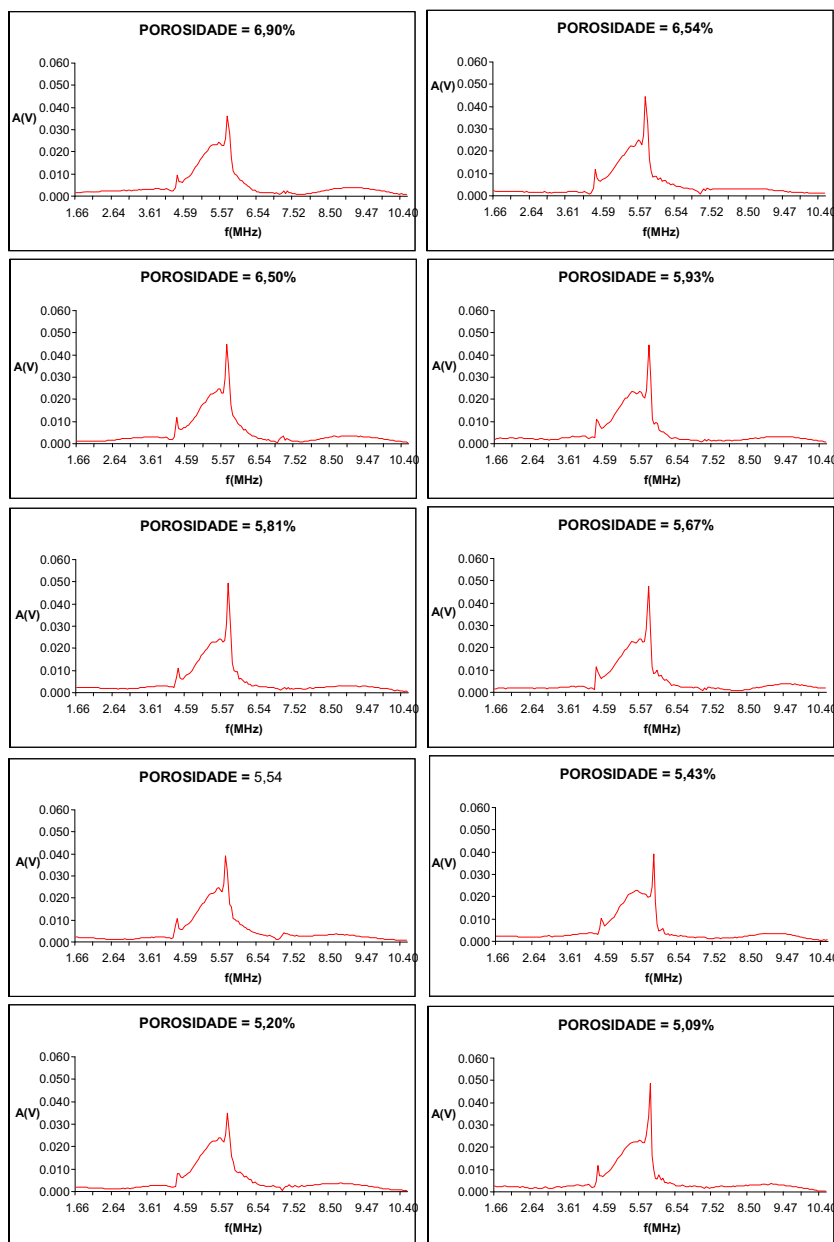
**Tabela 5.3: Resumo dos resultados do segundo treinamento.**

$R^2$	1,0000
$r^2$	1,0000
Erro médio quadrado	0,00
Erro médio absoluto	0,00
Mínimo erro absoluto	0,00
Máximo erro absoluto	0,00
Coefficiente de correlação r	1,0000
Percentual de erro menor que 5%	100,00%
Percentual de erro de 5% a 10%	0,00%
Percentual de erro de 10% a 20%	0,00%
Percentual de erro de 20% a 30%	0,00%
Percentual de erro maior que 30%	0,00%

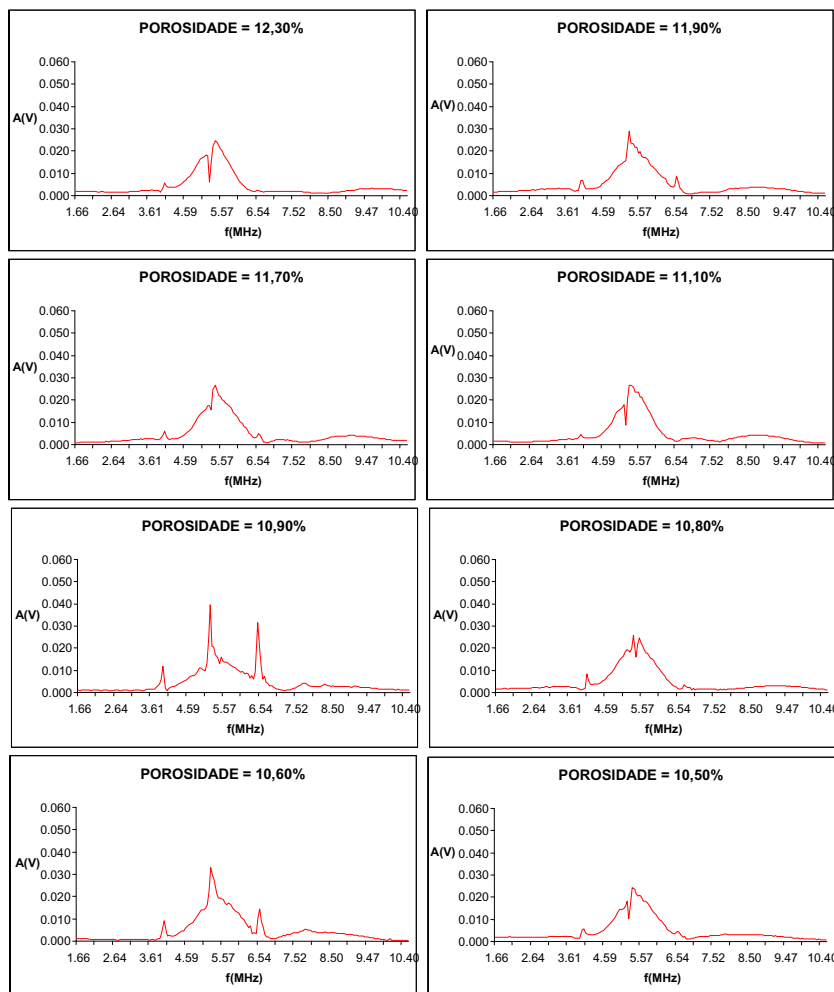
Em função destes resultados, o processo de retirada de todos os sinais com Q diferentes de 1 foi adotado como um novo procedimento dentro da metodologia desenvolvida para esta técnica, pois como mostrado isto atribui uma resolução ainda maior a técnica, permitindo a distinção de pastilhas com variações de porosidade de apenas 0,04%, o que ainda não é uma resolução absoluta, pois esta é a menor variação de porosidade encontrada nos corpos de prova utilizados neste trabalho. Acredita-se que esta técnica seja capaz de caracterizar a porosidade de pastilhas cerâmicas com uma precisão ainda maior, desde que se utilizem corpos de prova com diferenças de porosidade menores que 0,04%.

## 5.2 – ANÁLISE DA TÉCNICA

Faz-se necessário observar que na faixa de porosidade de 6,90% a 5,09%, tem-se 10 pastilhas com os seguintes valores de porosidades: 6,90%, 6,54%, 6,50%, 5,93%, 5,67%, 5,81%, 5,54%, 5,43%, 5,20% e 5,09. Assim, com estes 10 valores distintos de porosidade, este intervalo de aproximadamente 1,80% está bem caracterizado, e como era de se esperar inicialmente, os sinais apresentam a mesma tendência em sua forma como pode ser visto nos gráficos a seguir:



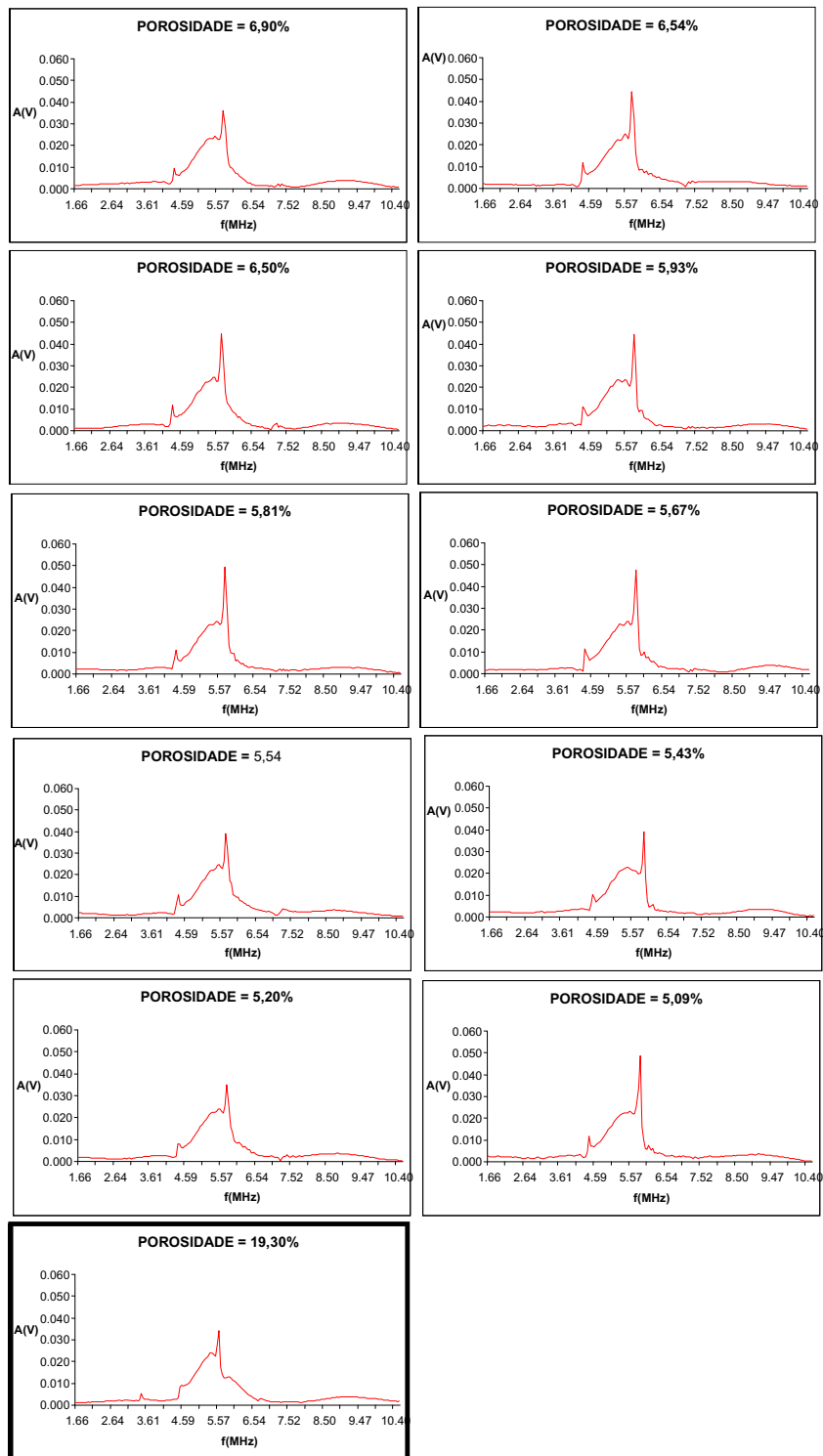
Porém para a faixa de porosidade de 12,30% a 10,50% (intervalo também de 1,80% de porosidade), não há uma tendência geral tão bem definida para a forma dos sinais das 8 pastilhas de porosidades iguais a: 12,30%, 11,90%, 11,70%, 11,10%, 10,90%, 10,80%, 10,60% e 10,50% que representam este intervalo. Abaixo, são mostrados os sinais destas pastilhas:



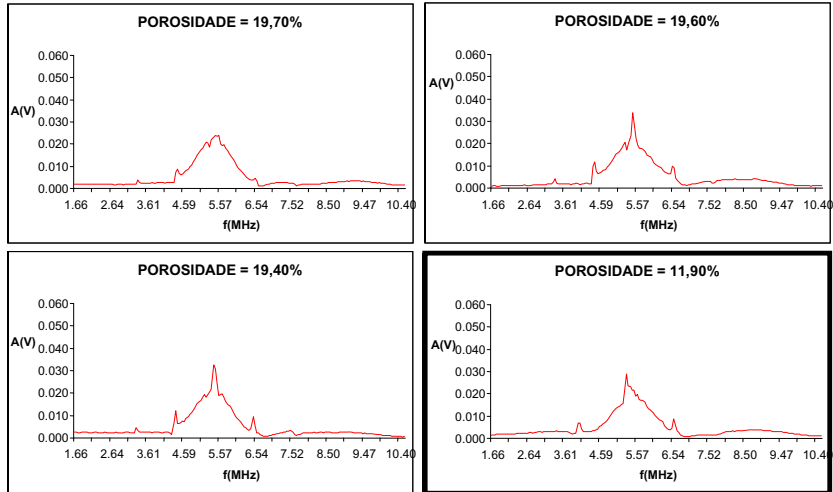
Ainda assim, com estes sinais, a rede consegue caracterizar as pastilhas com extrema precisão com relação a porosidade. O Apêndice A mostra os sinais de todas as pastilhas, no domínio do tempo e no domínio da frequência organizados em função do valor de porosidade (da maior para a menor porosidade), porém é interessante analisarmos visualmente os sinais e agrupá-los não por valores de porosidade e sim de maneira a criar grupos de pastilhas que possuem sinais semelhantes, independente de seu valor de porosidade. Assim, analisando

visualmente todos os sinais, dividiu-se as pastilhas em 7 grupos, onde cada grupo representa uma tendência a uma forma de sinal. Estes grupos são mostrados a seguir:

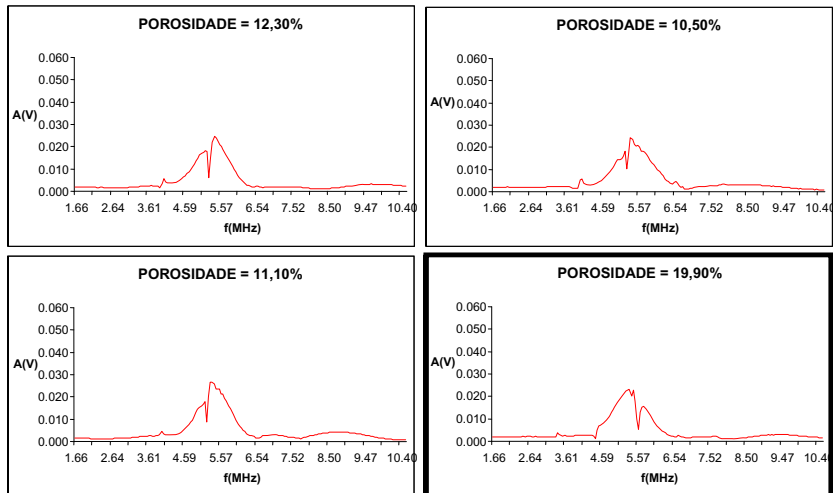
### GRUPO 1



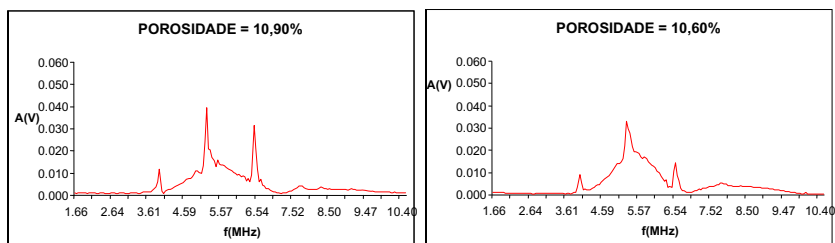
## GRUPO 2



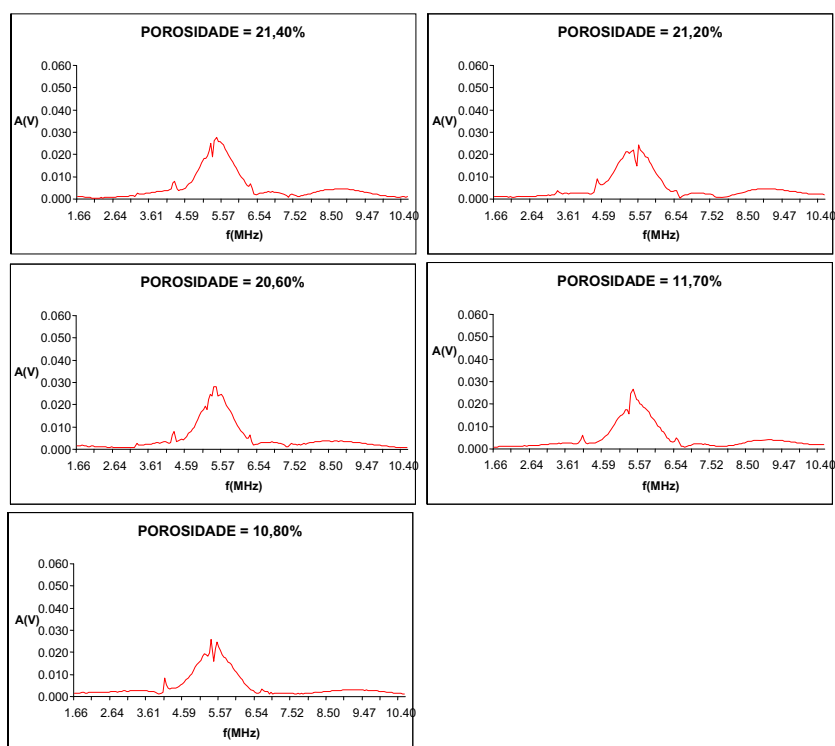
## GRUPO 3



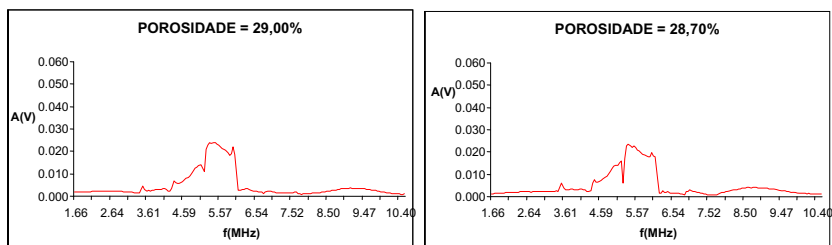
## GRUPO 4



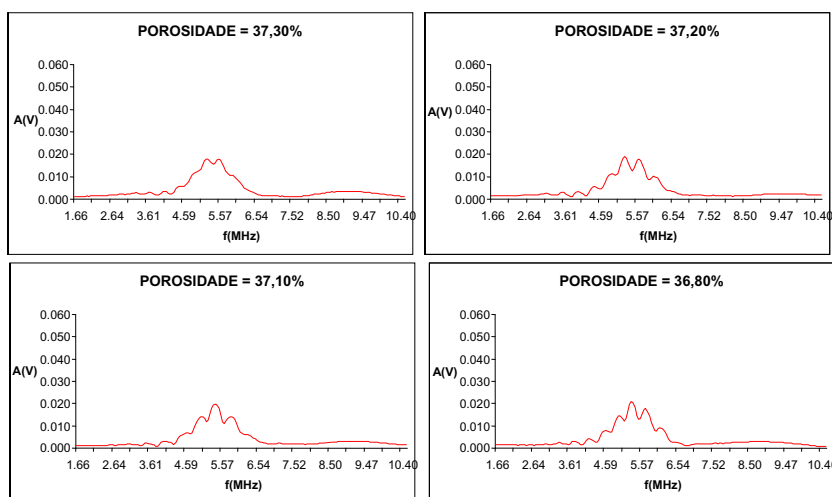
## GRUPO 5



## GRUPO 6



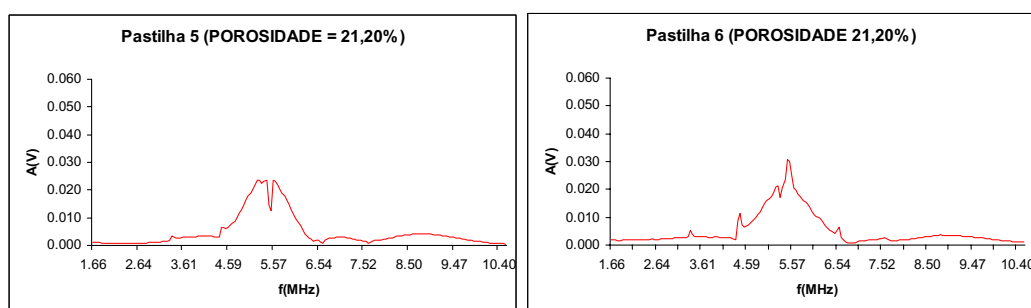
## GRUPO 7



Este arranjo não tem como regra, agrupar as pastilhas com valores próximos de porosidade. É curioso notar que sinais parecidos não necessariamente caracterizam pastilhas com porosidades próximas, como era de se esperar. Isto pode ser observado no grupo 1 em que a pastilha de porosidade 19,30% (realçada) foge completamente a tendência de porosidade das outras pastilhas deste grupo, porém tem sinal parecido com as demais de seu grupo. O mesmo acontece nos grupos 2 e 3, onde respectivamente as pastilhas de 11,90% e 19,90% (realçadas) não acompanham a tendência de porosidade das pastilhas de seus respectivos grupos. Analogamente, o grupo 4 onde estão as pastilhas de porosidade 10,60% e 10,90% não engloba os sinais das pastilhas de porosidade 10,50% e 10,80%, as

quais por possuírem sinais com formas diferentes, foram melhor classificadas nos grupos 3 e 5, respectivamente.

Estas observações sugerem que haja no sinal ultra-sônico uma influência bastante significativa de outras características das pastilhas, pois continuando esta análise, chega-se a um caso onde isto é mais evidente, que é o caso das pastilhas AC2 e AC3, ambas de porosidade igual a 21,20%. Apesar destas pastilhas possuírem porosidades iguais, seus espectros de frequência são diferentes, como mostra a figura 5.1.



**Figura 5.1: Formas diferentes do espectro de frequência para pastilhas que apresentam a mesma porosidade.**

Como durante o treinamento a rede ajusta uma função de acordo com os espectros de frequência (função esta que tem como saída um valor de porosidade), a diferença entre estes dois gráficos de pastilhas que possuem mesma porosidade não foi um problema. Pela própria definição matemática de função, pode-se ter dois valores (espectros) diferentes de entrada resultando em um mesmo valor de saída (porosidade), porém isto pode ser a razão da rede do tipo GRNN ter oferecido melhores resultados do que outros tipos de redes, já que a GRNN possui características de uma rede classificadora (não sendo eficiente ao interpolar dados). Outros tipos de rede que são capazes de criar interpolações entre os padrões de sinais podem ter apresentado dificuldades devido a estas diferenças nos sinais (valores de entrada) destas pastilhas com mesma porosidade (valor de saída).

Uma justificativa para a diferença no sinal destas pastilhas de mesma porosidade pode estar no processo de produção das pastilhas. Pequenas variações nas condições de fabricação podem ter afetado outras características das pastilhas, e como o material e o processo utilizado na produção das pastilhas é o mesmo, a



provável característica que pode ter sido influenciada pelas condições de produção e pode ser sensível ao pulso ultra-sônico é a distribuição de tamanho dos poros.

Como mostrado, estas dificuldades não impediram que a rede classificasse as pastilhas de maneira correta e precisa em relação a porosidade, conseguindo distinguir sinais de pastilhas com diferença de porosidade de apenas 0,04%. Porém o fato de pastilhas de porosidades próximas não apresentarem sinais parecidos faz com que a rede não consiga criar interpolações entre os padrões de sinais, o que limita a precisão da técnica em função dos corpos de prova – quanto maior o número de corpos de prova com porosidades diferentes, melhor a precisão. Porém se os sinais fossem adequados, variando-se somente a porosidade entre eles, seria possível caracterizar pastilhas com valores de porosidades que estivessem entre dois padrões utilizados no treinamento da rede, pois a rede poderia fazer interpolações entre os padrões já conhecidos tornando possível a análise de padrões intermediários, aumentando ainda mais a precisão da técnica.

Logo, torna-se necessário um estudo mais detalhado onde se utilize corpos de prova onde se conheça outras características que podem influenciar a forma do espectro de frequência do sinal ultra-sônico, já que de acordo com as observações realizadas, existe a possibilidade de utilização desta técnica não só para medidas de porosidade mas também para caracterização de distribuição de tamanho de poros.

## Capítulo 6 – COMENTÁRIOS FINAIS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma técnica não destrutiva, utilizando ultra-som para medida de porosidade em pastilhas de  $UO_2$ . Como mostrou-se, a técnica proposta é bastante promissora para nossos objetivos, pois mostrou-se muito precisa, sendo capaz de distinguir pastilhas de alumina com variações de porosidade de apenas 0,04%. Acredita-se que esta precisão pode ainda ser melhorada, desde que a rede seja treinada com corpos de prova com diferenças de porosidade ainda menores. Além disto, esta técnica possui diversas vantagens em relação a outros métodos de medida de porosidade, pois devido ao fato de ser ultra-sônica não envolve equipamentos complexos, sendo simples de ser implementada. Também não demanda nenhum procedimento complicado ou demorado, não necessitando de nenhuma preparação do material, o que colabora para que se obtenham resultados com rapidez.

Devido ao fato desta técnica ser completamente nova, tornam-se necessários alguns estudos voltados tanto para seu aperfeiçoamento e refinamento, quanto também para a exploração de suas potencialidades. Porém devido a precisão alcançada (0,04%) pode-se concluir que a técnica proposta pode vir a ser utilizada como uma importante ferramenta para a caracterização de materiais.

Espera-se que esta técnica seja utilizada em procedimentos laboratoriais para análise e controle do combustível nuclear, assim que comprovados os resultados deste trabalho com medidas diretas em pastilhas de  $UO_2$ .

## SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

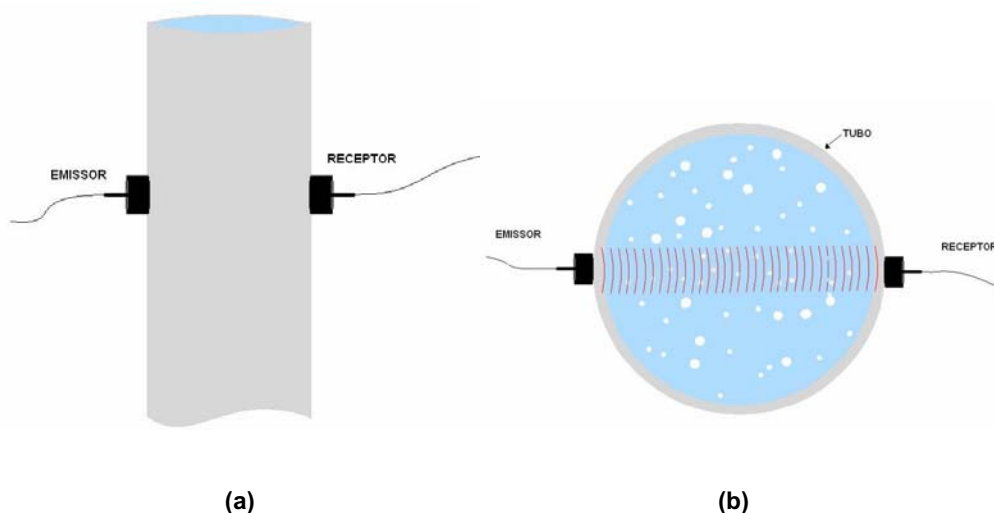
Esta é uma técnica completamente nova que foi desenvolvida inicialmente com o objetivo único de medir porosidades em pastilhas de combustível nuclear. Porém ao longo de seu desenvolvimento, alguns estudos e ensaios mostraram que ela pode ser facilmente utilizada para diversos fins não só na caracterização de materiais cerâmicos, mas em diversas outras aplicações. Esta técnica possibilitou a caracterização de materiais cerâmicos, porém pode ser utilizada em qualquer outro meio em que o pulso ultra-sônico se propague.

Assim, para explorar as potencialidades desta técnica, alguns estudos já foram iniciados, na qual expandiu-se a técnica para utilização em aplicações bem distintas, demonstrando a abrangência de aplicações da mesma. Com isto, podemos então citar algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Realizar medidas diretas em corpos de prova de  $UO_2$ , já que o objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma técnica para medidas de porosidade deste tipo de material.
- Desenvolver um software que atribua maior dinamismo ao processo de aquisição e tratamento de dados, através de recursos como: cálculo do sinal médio em tempo real, geração automática do arquivo de treinamento da rede, entre outros recursos adicionais que podem facilitar todo o processo de caracterização de materiais através desta técnica.
- Estudar em detalhes e definir exatamente os fenômenos responsáveis pela deformação do pulso inicial, permitindo aperfeiçoamentos na técnica que possibilitem expandi-la e refiná-la ainda mais.
- Estudar a distribuição de tamanho de poros e verificar se realmente este fator teve influência nos sinais analisados. Se isto for constatado, pode ser que se consiga adaptar esta técnica para analisar também a distribuição de tamanho de poros, aumentando ainda mais suas aplicações.

- Analisar a possibilidade de utilizar esta técnica para a caracterização de escoamentos, pois testes preliminares mostraram a eficácia da técnica na medida da fração de vazio e na distribuição do tamanho de bolhas. É possível que um esquema de montagem simples (Figura 6.1) possibilite estudos de escoamentos bifásicos (*bubbly flow*), que são de extrema importância na área nuclear, pois a caracterização deste tipo de escoamento em usinas garante a eficiência e até mesmo a segurança dos reatores nucleares.

Na produção de petróleo, o escoamento bifásico também é freqüentemente encontrado em dutos durante a extração

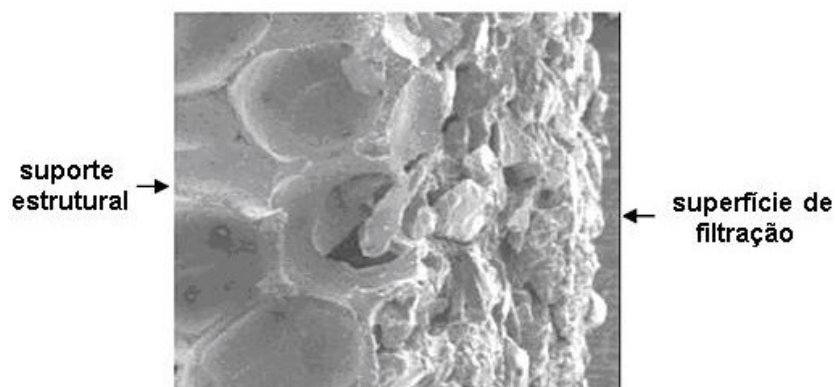


**Figura 6.1:** esquema para medidas em escoamento bifásico em (a) e corte na seção transversal ao tubo em (b).

- Existe hoje uma ampla utilização de membranas de filtração em diversas áreas, utilizadas, por exemplo, na esterilização bacteriana, dessalinização de água, hemodiálise, eliminação de poluentes da água entre outras. Estas membranas apresentam diversos tipos de morfologia (porosidades e tamanhos de poros) que variam de acordo com a aplicação. Assegurar as características da membrana

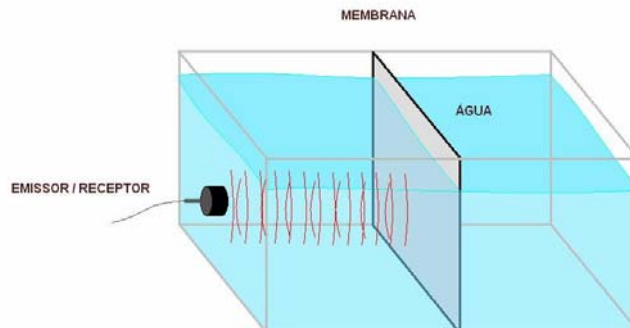
utilizada é um processo complicado na qual utiliza-se entre outras, técnicas de microscopia eletrônica de varredura, como mostrado na Figura 6.2. Contudo, o rigor do processo de fabricação assegura membranas com características bem definidas. Porém devido ao alto custo de alguns tipos de membranas, é possível que seja feita uma reutilização das mesmas, porém para garantir sua eficiência torna-se necessário um processo de limpeza e averiguação de suas características de filtração (porosidade e tamanho de poros).

Assim, por não ter encontrado a princípio, limitações para a utilização da técnica desenvolvida neste trabalho, no que diz respeito a espessura do material analisado, pode ser que esta seja útil na caracterização de membranas de filtração, podendo ter aplicações ainda mais específicas dentro deste estudo, como por exemplo a análise somente da superfície da membrana ou de toda a estrutura da membrana. Isto se justifica devido às membranas serem produzidas em camadas, possuindo basicamente a camada estrutural que fornece suporte e resistência mecânica a membrana, e a camada de filtração onde efetivamente ocorre a retenção do material.



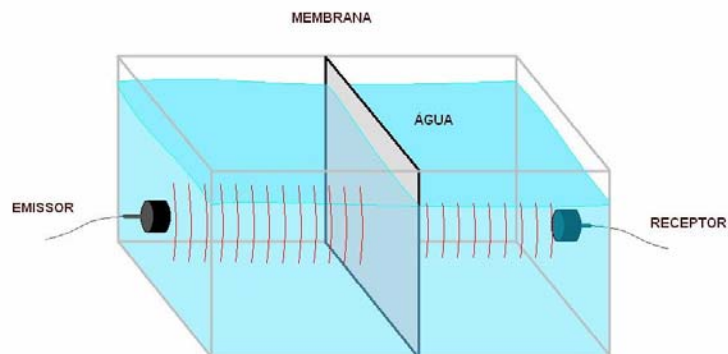
**Figura 6.2: Micrografia da seção transversal da membrana de filtração obtida em microscópio eletrônico de varredura.**

Com o objetivo de caracterizar a membrana em relação ao tamanho das partículas por esta retidas no processo de filtração, pode ser que seja possível analisar somente a superfície e caracterizar sua porosidade e a distribuição de tamanho de poros utilizando um transdutor no modo pulso-eco, assim, o sinal ultra-sônico é refletido pela superfície da membrana e volta ao transdutor, trazendo informações de sua superfície (figura 6.3).



**Figura 6.3: Esquema mostrando transdutor de imersão sendo utilizado no modo pulso-eco para análise superficial da membrana.**

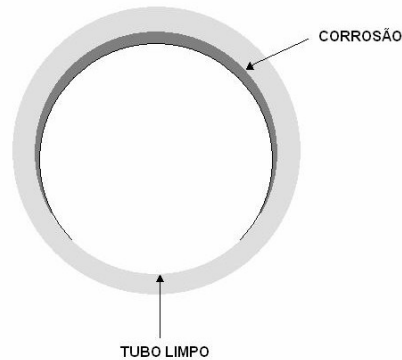
Pode-se também fazer uma análise de toda a estrutura da membrana ao se utilizar dois transdutores no modo de transmissão. Neste modo um transdutor emite o pulso ultra-sônico, e outro transdutor atrás da membrana capta este sinal depois de atravessar e interagir com toda a estrutura da membrana (Figura 6.4), trazendo informações sobre sua estrutura interna.



**Figura 6.4: Dois transdutores no esquema de análise no modo de transmissão.**

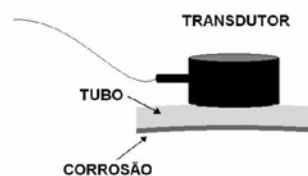
- Tubulações são amplamente utilizadas para transporte de substâncias com os mais diversos fins. Estas substâncias podem ser tóxicas, inflamáveis, ou puramente essenciais para o funcionamento de determinados processos, como no caso de líquidos refrigerantes. Desta forma, torna-se necessário assegurar a integridade das tubulações que transportam estas substâncias, garantindo um transporte seguro.

No setor nuclear, depósitos de produtos de corrosão nos tubos do gerador de vapor, como mostra o esquema da Figura 6.5, podem ocasionar defeitos de transferência de calor, reduzindo sua eficiência térmica.



**Figura 6.5: Esquema de tubo com áreas em corrosão.**

Esta técnica também pode ser adequada para se estudar o nível de corrosão em superfícies, utilizando-se do reflexo do pulso ultra-sônico na superfície interna de tubulações para se analisar diferentes níveis de corrosão nestas estruturas (Figura 6.6). Utilizando-se freqüências adequadas, pode-se ter interações do pulso ultra-sônico com os produtos de corrosão, alterando o espectro de freqüência em função do nível de corrosão. Assim pode-se fazer uma análise do estado das superfícies internas nestas estruturas.



**Figura 6.6: Nesta aplicação, um transdutor de ondas transversais é mais adequado, para que não haja interação do pulso ultra-sônico com o fluido no interior do tubo.**

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, M. & FINN, E. J. "**Física – um curso universitário**", 10ª edição, Edgard Blücher LTDA, p 492, 2004.

ANDREUCCI, Ricardo. "**Ensaio por Ultra-som – Aspectos Básicos**", Apostila ABENDE, 3ª edição, 2002.

ASTION, M; WILDING, P. "**The application of backpropagation neural networks to problems in pathology**" Arch. Pathol. Lab. Med. 116, 995–1001, 1992.

BRAGA, A. P.; LUDEMIR, T. B. ; CARVALHO, A. C. P. F. "**Redes neurais artificiais – teoria e aplicações**". Rio de Janeiro. LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S/A , p. 237, 2000.

BRAY D. E.; STANLEY R. K., "**Nondestructive evaluation – A tool in design, manufacturing, and service**", Flórida: Boca Raton: CRC Press, 1997.

CAETANO, Sidney Felix, "**Determinação das Constantes Acustoelásticas para Aço API 5L-X70 para Gasodutos**". Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

CHAPMAN, J. V. ; CROSSLAND, A. D. "**Neural networks in probabilistic structural mechanics**". Probabilistic Structural Mechanics Handbook. New York, Chapman & Hall, p. 317-330, 1995.

FORSSTRÖM, Jari J.; DALTON, Kevin J. "**Artificial neural networks for decision support in clinical medicine**". Annals of Medicine. v.27, n.5, p.509-517, 1995.

FREEMAN, J. A. ; SKAPURA, D. M. - **Neural networks: algorithms, applications, and programing techniques**. New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1992.



GOMEZ F. Ramirez., **“Introducción a los métodos de ensayos no desctrutivos de control de la calidad de los materiales”**, INTA, 2ª edição, p. 227-228, 1980.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **“Física Volume 1”**, 5ª Edição, LTC S/A, p. 125 e 129, 2004.

LAMY, Carlos Alfredo, **“Um estudo sobre o dimensionamento de descontinuidades superficiais pela técnica ultra-sônica do tempo decorrido”**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Rio de Janeiro COPPE/UFRJ, 1990.

LAUX D., et al., **“Ultrasonic study of  $UO_2$ : effects of porosity and grain size on ultrasonic attenuation and velocities”** J. Nucl. Mat. 300, p.192-197, 2002.

LIPPMAN, R. P. - **Introduction to computing with neural nets**. IEEE Acoustic, Speech, and Signal Processing Magazine, p. 4-22, 1987.

MATAREZZI, J. C.; RODRIGUES, A. M. **Curso de Qualificação no Ensaio por Ultra-som Nível II**, Centro Técnico Aeroespacial, Publicação interna, março de 2001.

MORAIS D. R., ROLIM J. G. – **“A Neural network for detection of incipients faults in transformers based on the dissolved gas analisys of insulating oil”**, VI INDUSCON, 2004.

ORTEGA, L. P. C. **“Análise de Tensões por Ultra-som através da Refração de ondas com Incidência Oblíqua”**, Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

PANAKKAL J. P., GHOS J. K., ROY P. R., **“Use of ultrasonic velocity for measurement of density of sintered fuel pellets”** J. Phys. D: Applied Phys. 17, p. 1791-1795, 1984.

PATTERSON, D. W. - **Artificial neural networks: theory and applications**. Singapore: Simon & Schuster (Asia) Pte Ltd, 1996.

RIBEIRO S. R. A., Centeno J. S. – “**Classificação do uso do solo utilizando redes neurais e o algoritmo MAXVER**”, Anais SBSR, p.1341-1348, p. 2001.

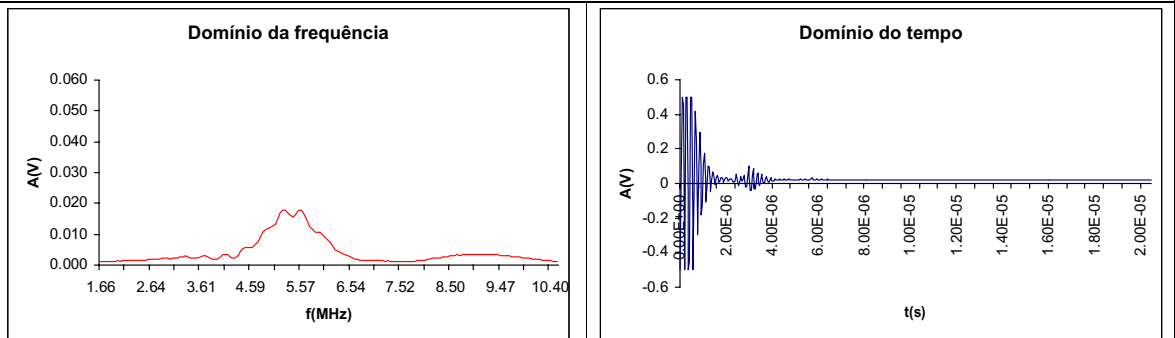
ROUSH W.B.; KIRBY Y.K.; CRAVENER T.L.; WIDEMAN R.F. “**Artificial neural network prediction of ascites in broilers**”. Poultry Science, v. 75, p. 1479-1487, 1996.

SANTIN, J. L. “**Curso de Técnica e Aplicação de Ultra-som**”, Petrobrás – Petróleo Brasileiro S/A. Publicação Interna, 1993.

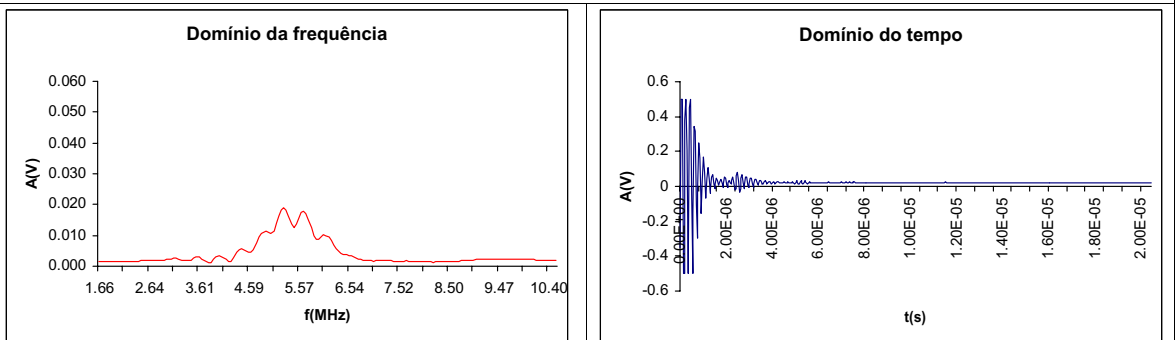
SANTOS J. G., et al., “**Estudo preliminar de caracterização de alumina através de ondas ultra-sônicas**” Anais 42º Congresso de cerâmica, 1998.

## APÊNDICE A

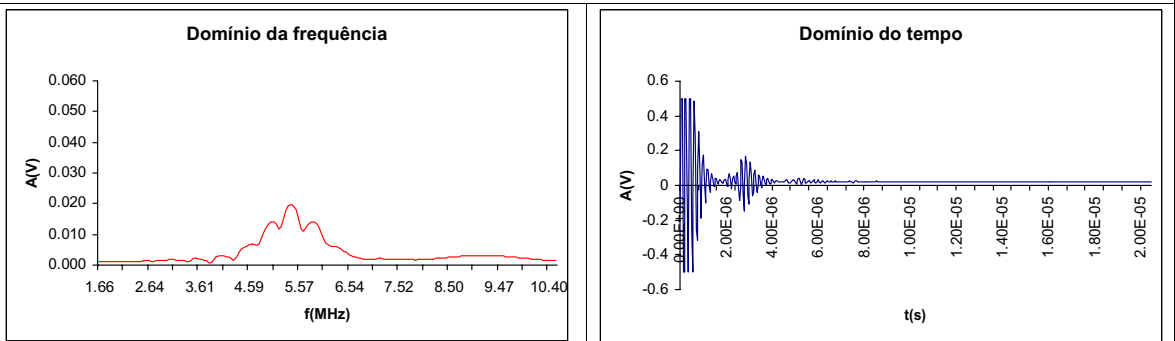
**Porosidade = 37,30%**



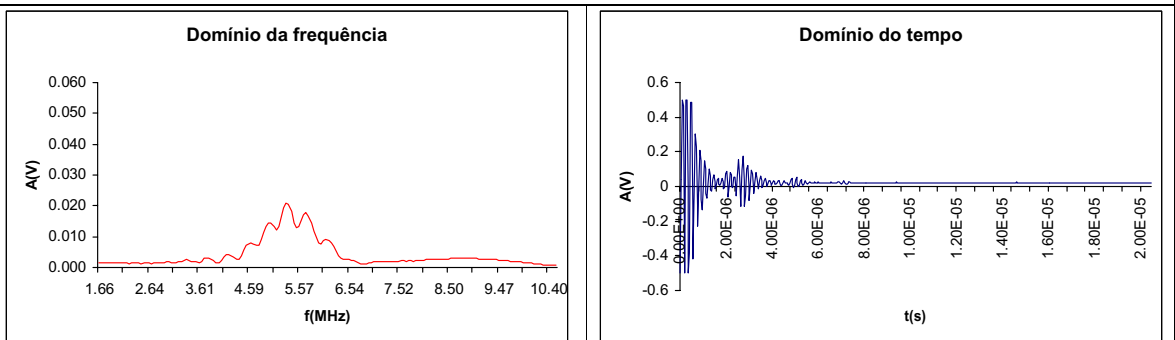
**Porosidade = 37,20%**



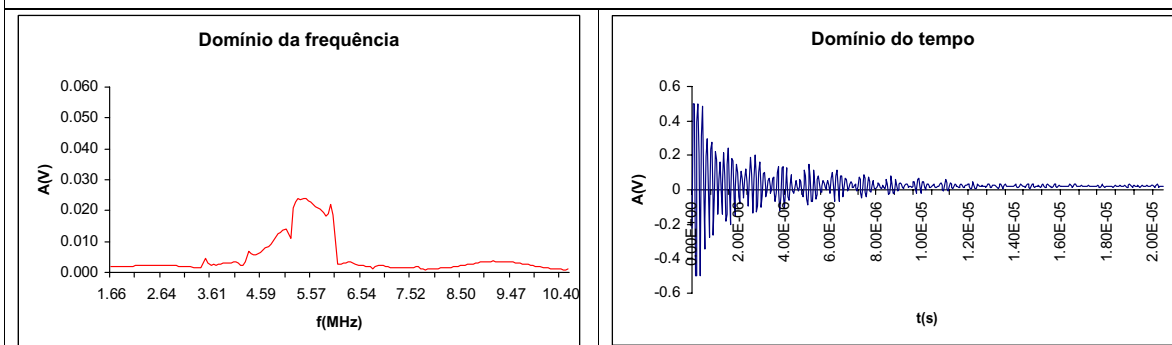
**Porosidade = 37,10%**



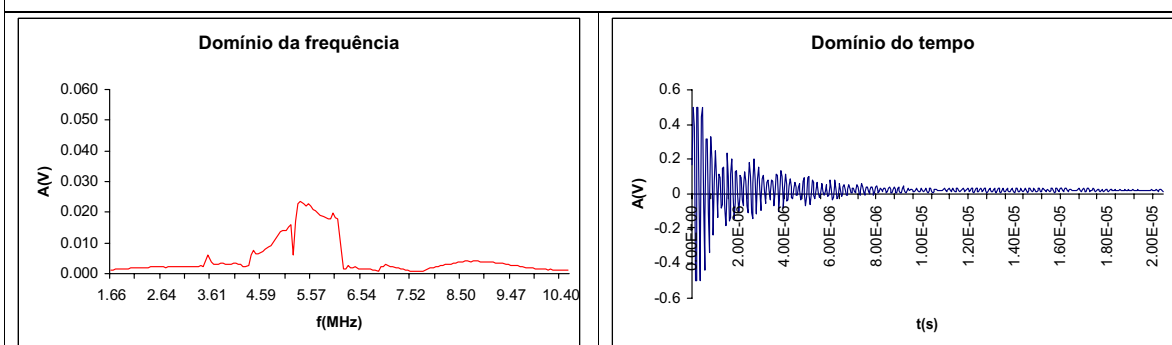
**Porosidade = 36,80%**



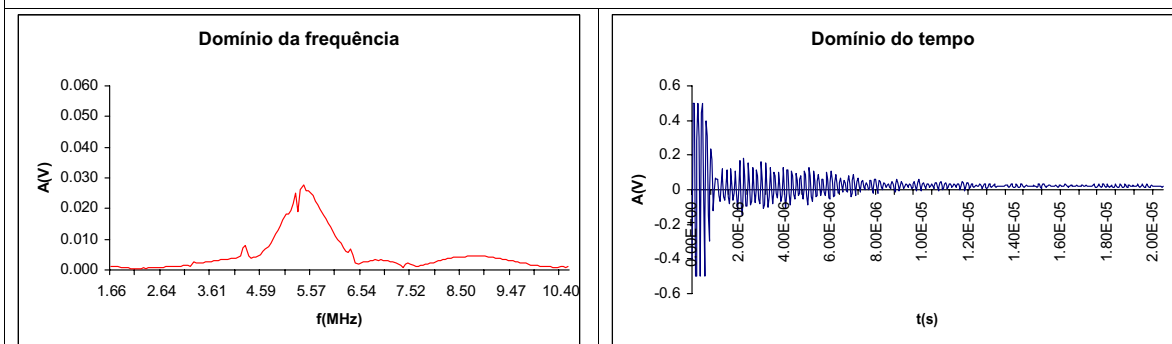
**Porosidade = 29,00%**



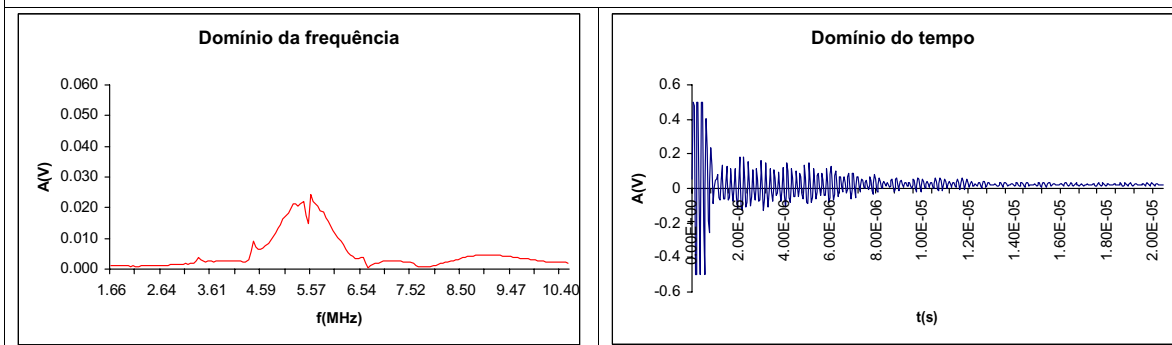
**Porosidade = 28,70%**



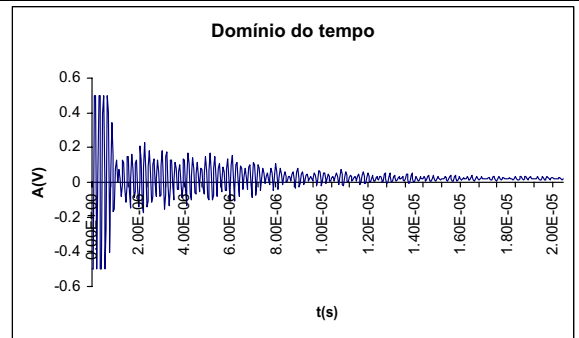
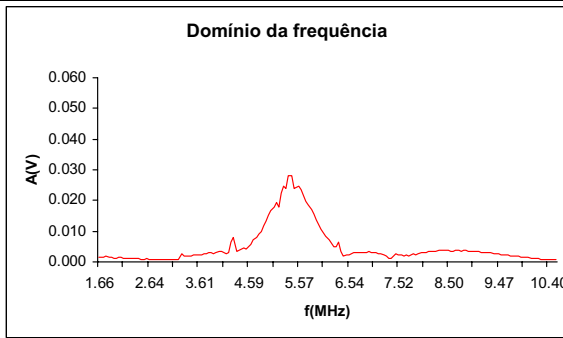
**Porosidade = 21,40%**



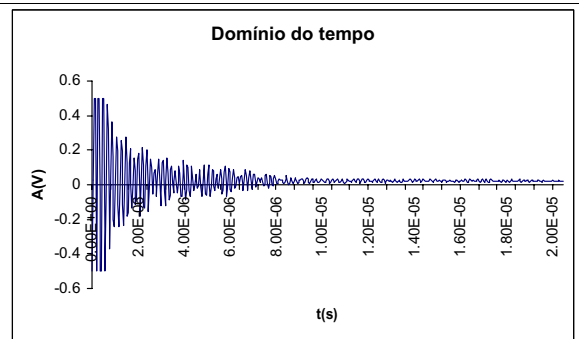
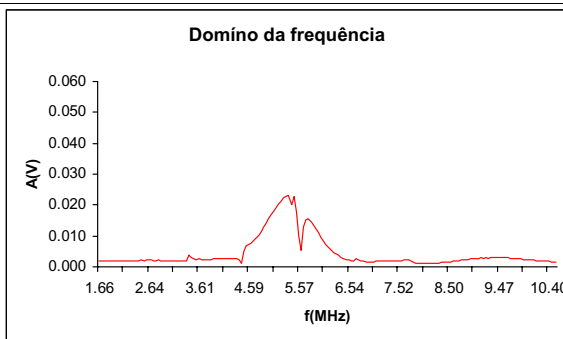
**Porosidade = 21,20%**



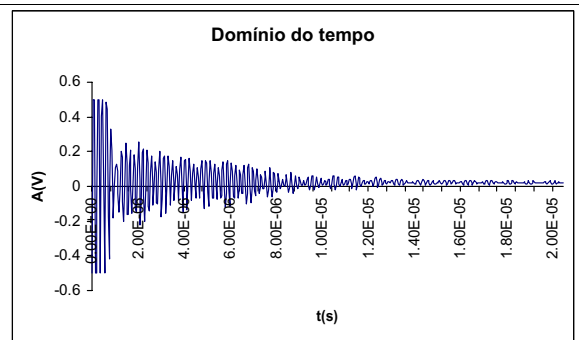
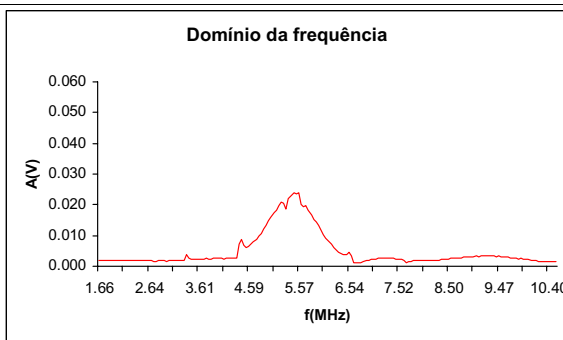
**Porosidade = 20,60%**



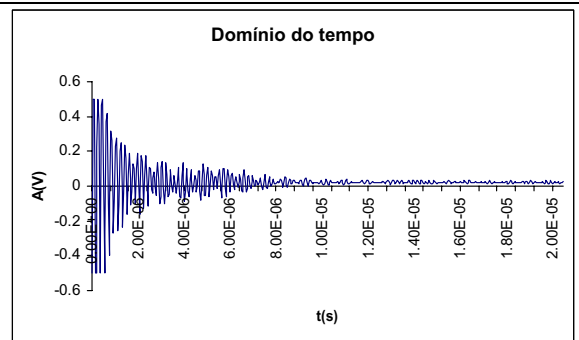
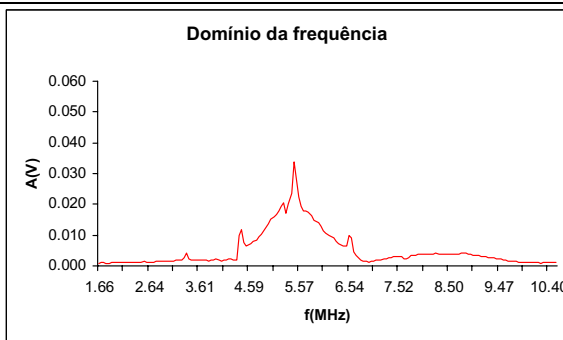
**Porosidade = 19,90%**



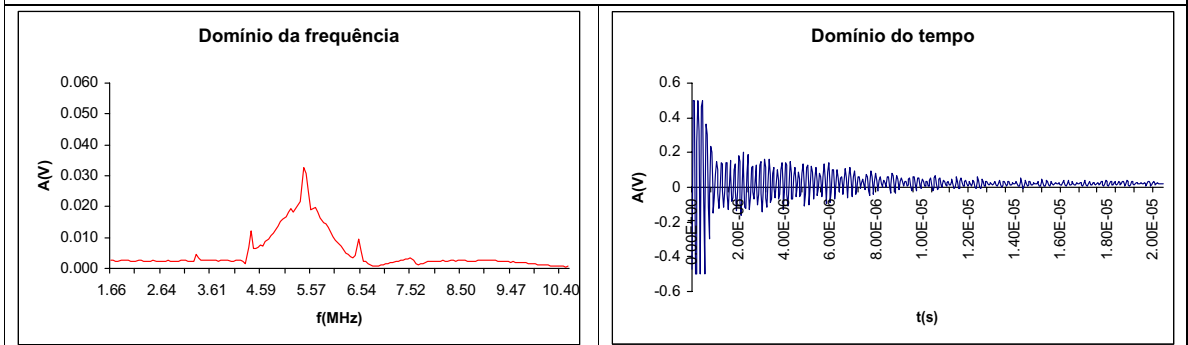
**Porosidade = 19,70%**



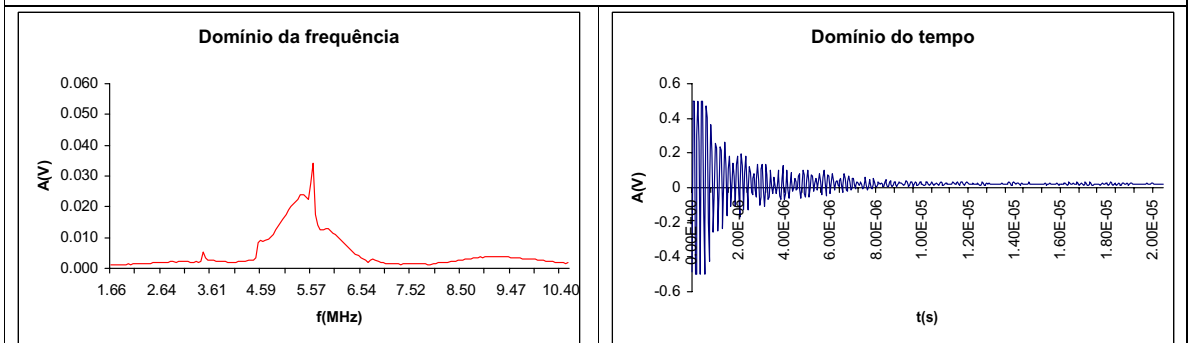
**Porosidade = 37,10%**



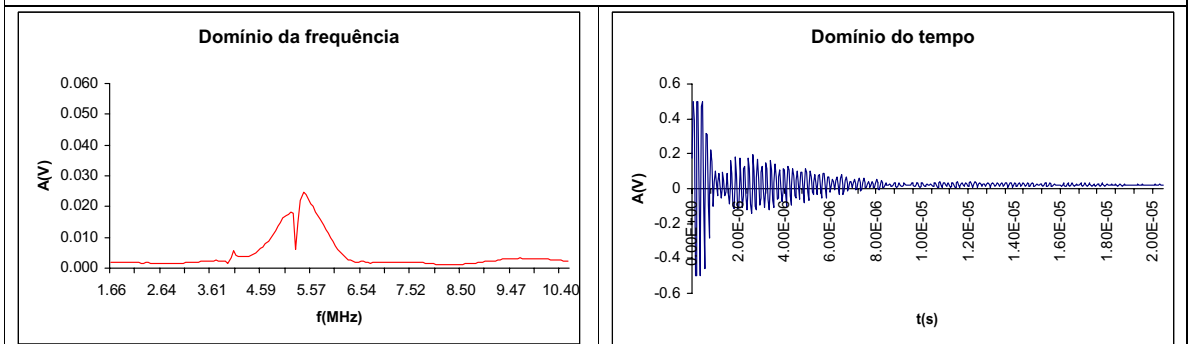
**Porosidade = 19,40%**



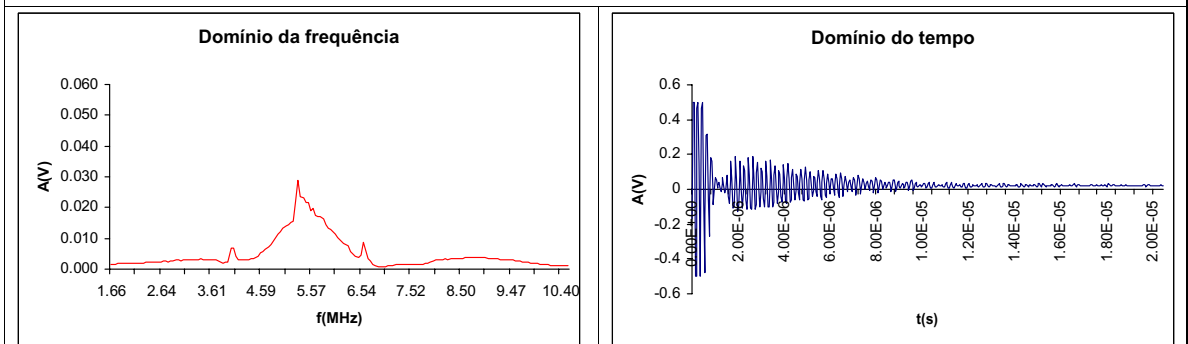
**Porosidade = 19,30%**



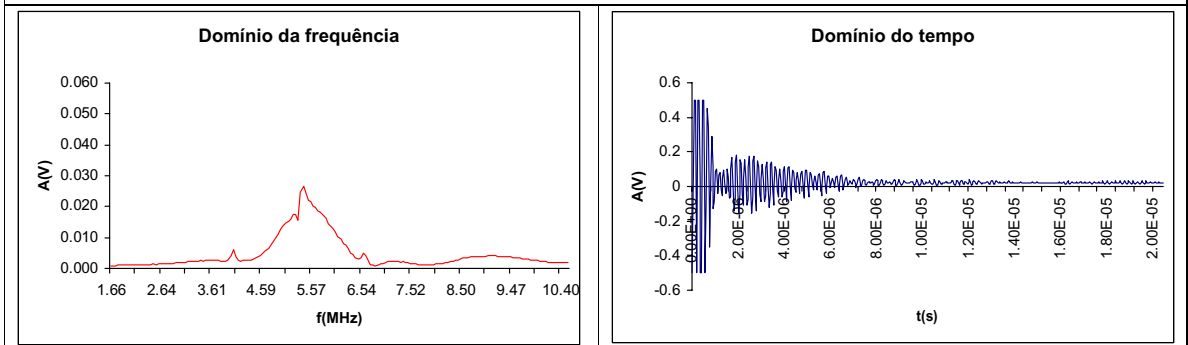
**Porosidade = 12,30%**



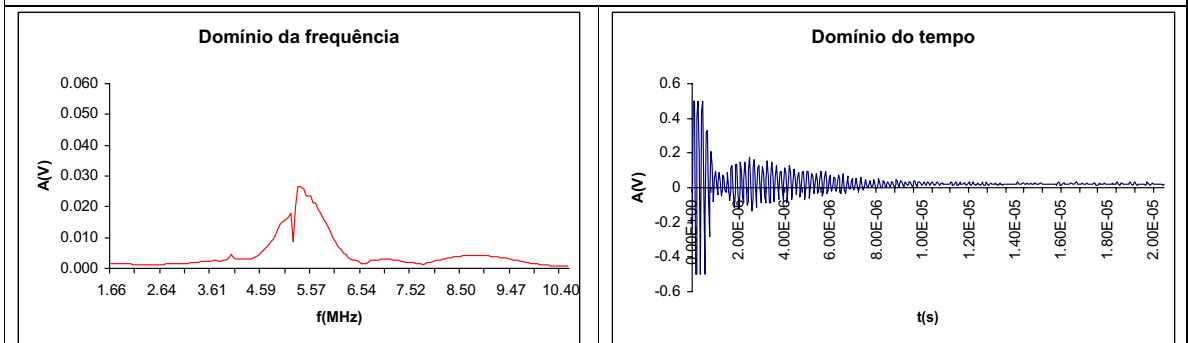
**Porosidade = 11,90%**



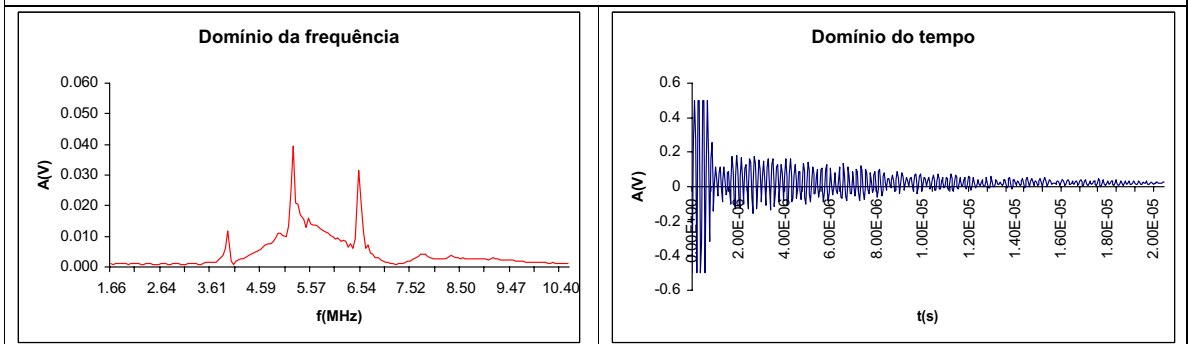
**Porosidade = 11,70%**



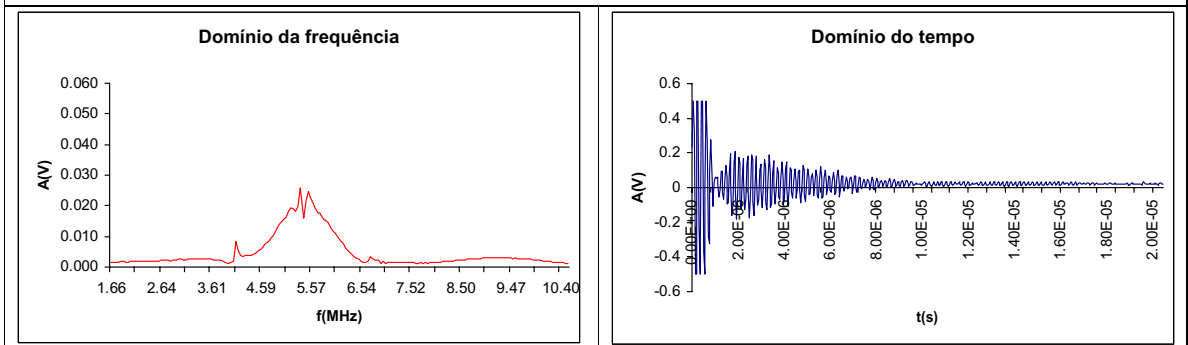
**Porosidade = 11,10%**



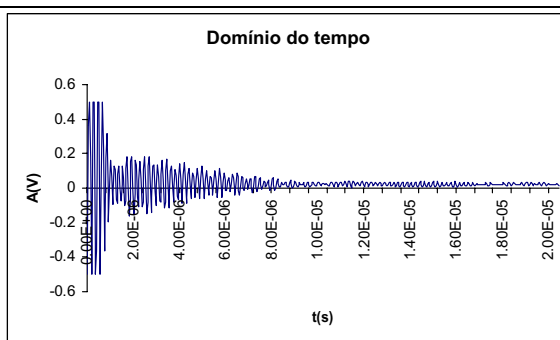
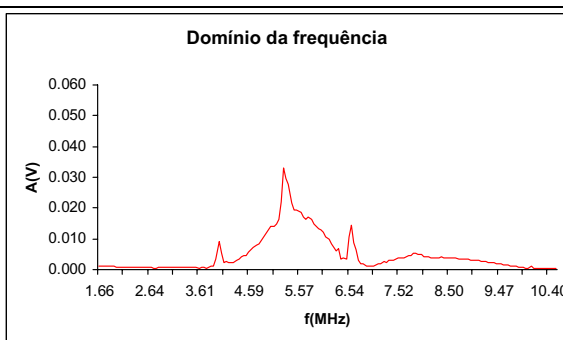
**Porosidade = 10,90%**



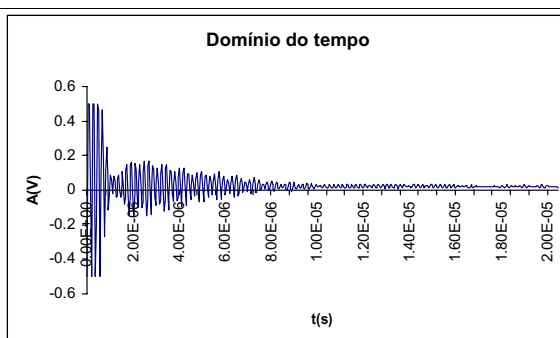
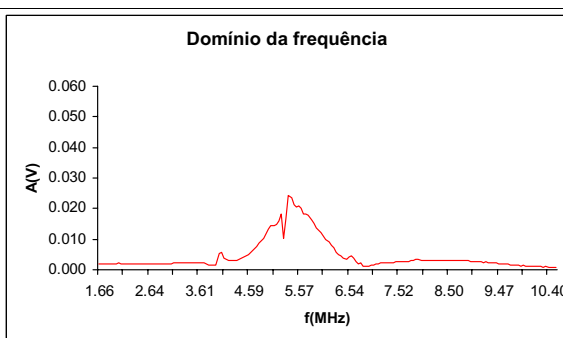
**Porosidade = 10,80%**



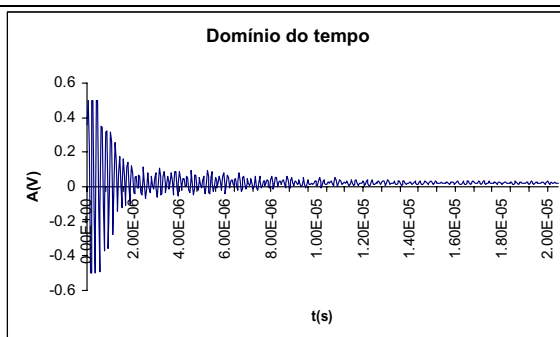
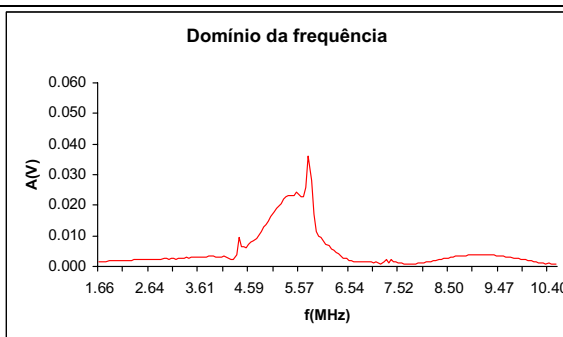
**Porosidade = 10,60%**



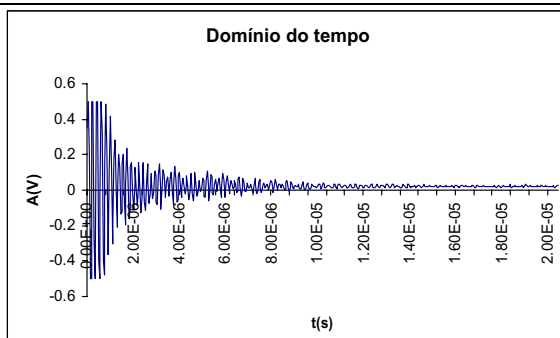
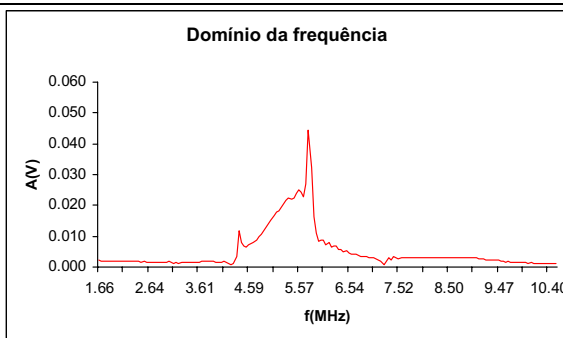
**Porosidade = 10,50%**



**Porosidade = 6,90%**

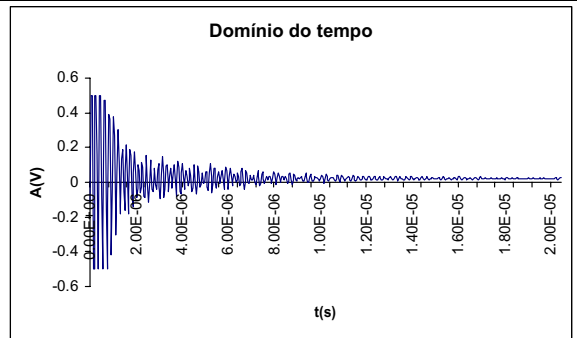
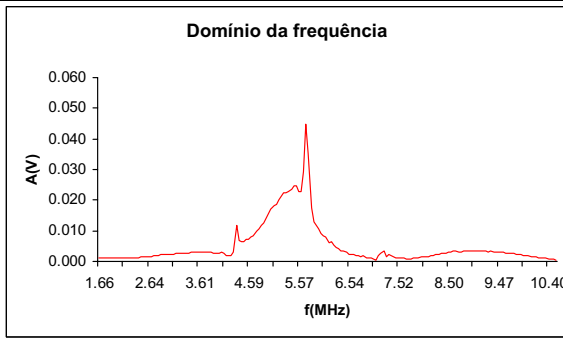


**Porosidade = 6,54%**

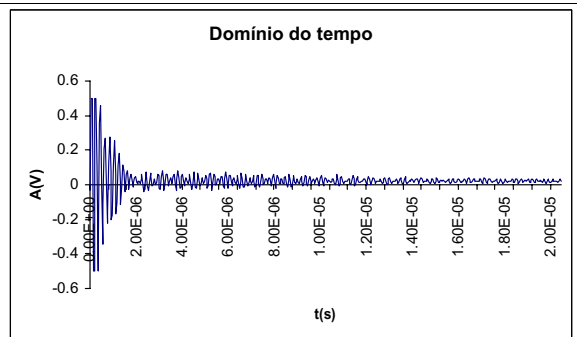
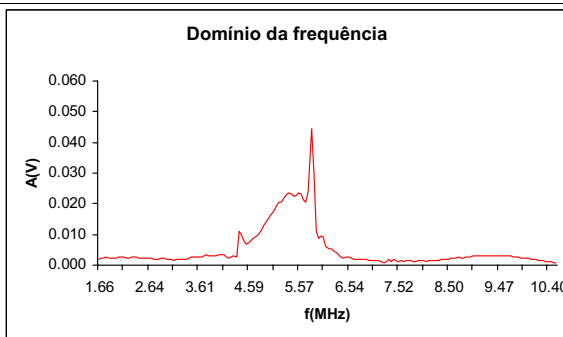




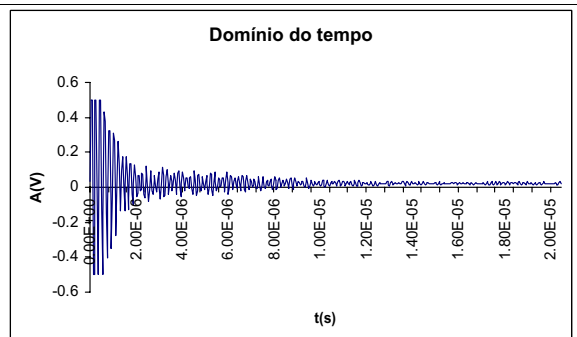
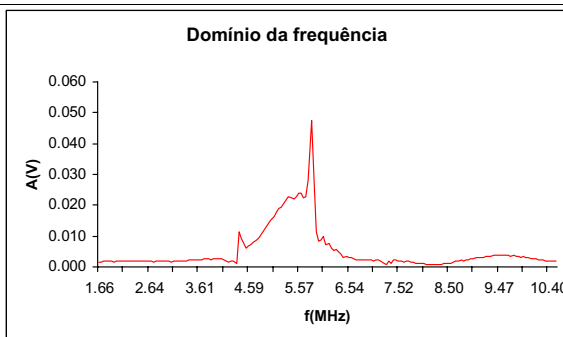
**Porosidade = 6,50%**



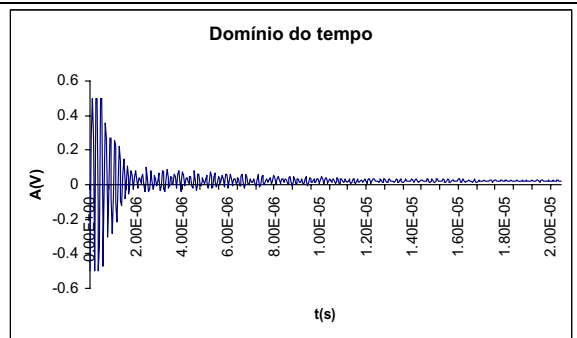
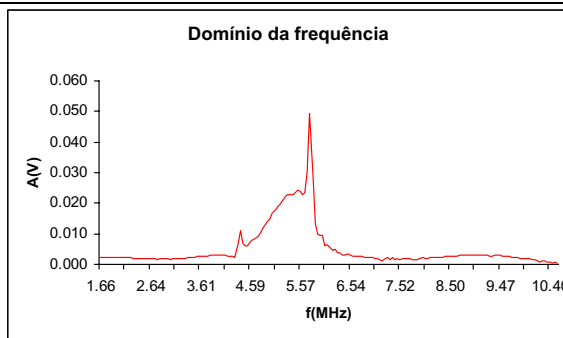
**Porosidade = 5,93%**



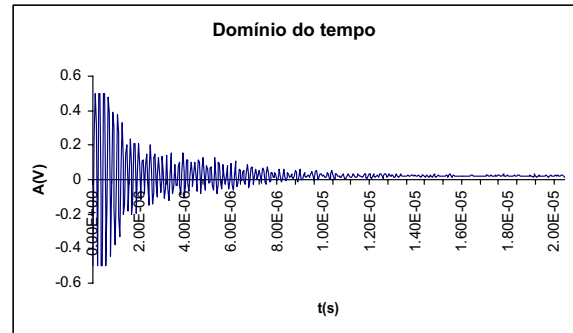
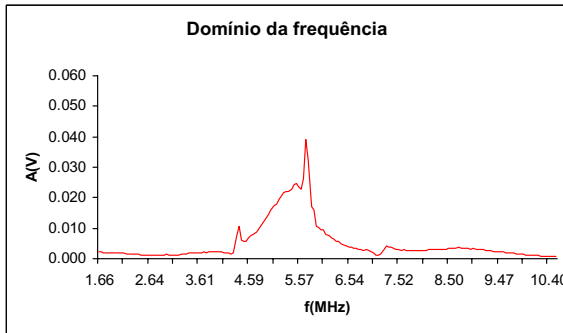
**Porosidade = 5,81%**



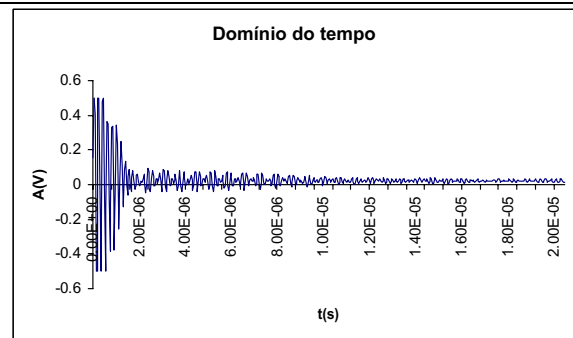
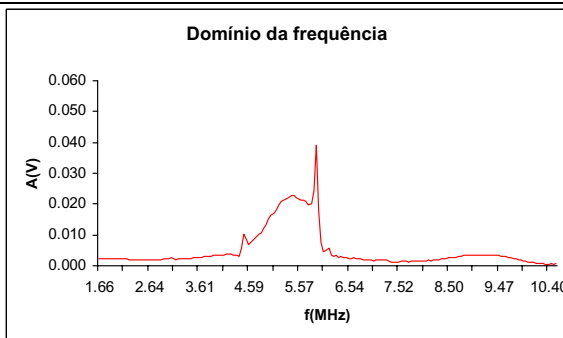
**Porosidade = 5,67%**



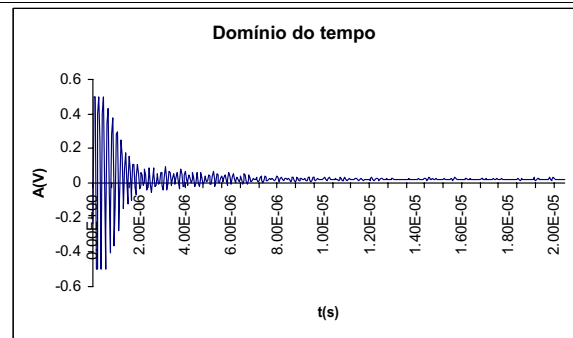
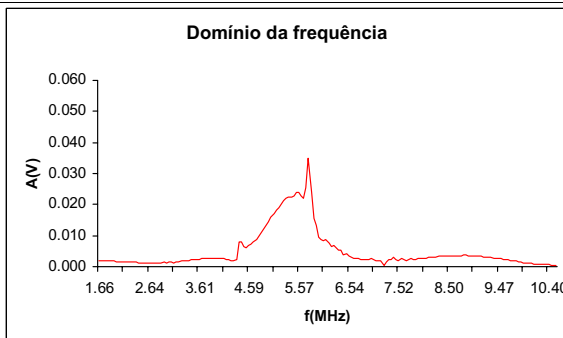
**Porosidade = 5,54%**



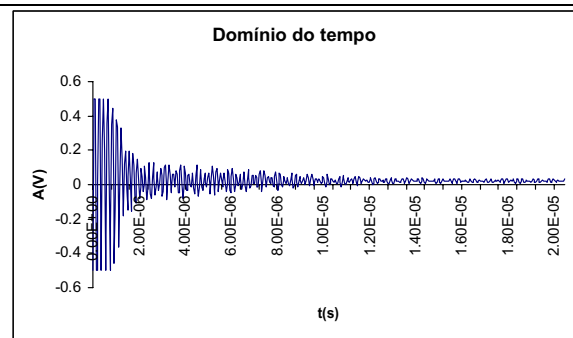
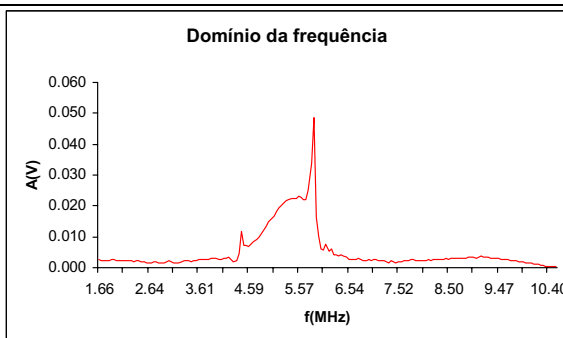
**Porosidade = 5,43%**



**Porosidade = 5,20%**



**Porosidade = 5,09%**



## APÊNDICE B

### Transformada de Fourier

Geralmente, a denominação "Transformada de Fourier" refere-se à Transformada de Fourier para funções contínuas, que efetua uma transformação de um sinal contínuo no domínio dos tempos  $f(t)$  para o domínio das frequências  $F(\omega)$  como a soma de exponenciais complexas com frequência angular  $\omega$ .

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

### Transformada discreta de Fourier

Para uso em computadores, seja para aplicações científicas ou em processamento digital de sinais, é preciso ter valores  $x_k$  discretos. Para isso existe a versão da transformada para funções discretas.

$$x_k = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} f_j e^{\frac{2\pi}{n}jk} \quad k = 0, \dots, n-1$$

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-\frac{2\pi}{n}jk} \quad j = 0, \dots, n-1$$

## O Algoritmo FFT

O algoritmo baseia-se no chamado método de dobramentos sucessivos, onde podemos expressar a transformada de Fourier como sendo

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) W_N^{ux}$$

onde,  $W_N^{ux} = e^{\frac{-j2\pi}{N}}$

Assumimos que  $N = 2^n$ , onde n é um inteiro positivo.

Portanto, N pode ser escrito como  $N = 2M$  onde M é um inteiro positivo. Logo, a transformada de Fourier escrita inicialmente, pode ser reescrita como:

$$F(u) = \frac{1}{2M} \sum_{x=0}^{2M-1} f(x) W_{2M}^{ux}$$

A soma escrita acima pode ser separada em duas, da seguinte maneira:

$$F(u) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x) W_M^{u(2x)} + \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x+1) W_{2M}^{u(2x+1)} \right]$$

Considerando que,

$$W_{2M}^{2ux} = W_M^{ux}$$

Nomeamos a primeira soma por:

$$F_{par}(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x)W_M^{ux} \quad u = 0,1,2,3,\dots,M-1$$

e a segunda soma por:

$$F_{impar}(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x+1)W_{2M}^{ux} \quad u = 0,1,2,3,\dots,M-1$$

Podemos então reescrever a transformada de Fourier como sendo:

$$F(u) = F_{par}(u) + F_{impar}(u)W_{2M}^u$$

Uma vez que,

$$W_M^{u+M} = W_M^u \quad \text{e} \quad W_{2M}^{u+M} = -W_{2M}^u$$

A recombinação da equação  $F_{par}(u)$  com a última nos fornece:

$$F(u+M) = F_{par}(u) - F_{impar}(u)W_{2M}^u$$

A observação dessas equações nos fornece suas propriedades. Dentre elas vemos que uma transformada de N pontos pode ser computada pela divisão da expressão original em duas partes

## APÊNDICE C

### Especificações do equipamento EXPLORER II

<i>ToneBurst Pulser / Receiver Specifications</i>		<i>Pulser Specifications</i>	
Output Voltage	1000V peak to peak @ 5MHz	Types	2
Waveform Type	Bipolar Gated Sinewave (toneburst)	Modes	Spike and/or Toneburst
Pulse Width	40nS to 20µS (optional to 100µS)	Triggering	Internal or External, + or -
Power Output	2500W RMS into 50 Ohms	<i>Spike Pulser / Receiver Specifications</i>	
Output Impedence	50 Ohms	Output Voltage	150 to 300V
Frequency Range	50KHz to 20MHz	Waveform Type	Unipolar Negative Spike
Repetition Rate	10 to 10000pps	Damping	25 to 500 Ohms
On-Off Ratio	In excess of 120dB	Repetition Rate	500 to 5000 Ohms
Max. Duty Cycle	0.2%	Rise Time	less than 8nS @ 300V
Gain	0 to 70dB	Bandwidth	0.5 to 50MHz, optional to 100MHz
Dynamic Range	70dB	Input Impedence	50 Ohms
Bandwidth	50KHz to 20MHz	Output Impedence	50 Ohms
Lowpass Filters	7 selectable, 100KHz to 10MHz	Gain	0dB to +63.5dB, Step Size .5dB
Highpass Filters	7 selectable, 100KHz to 10MHz	Dynamic Range	+63.5dB
Rectification Modes	None, Fullwave, +/-Halfwave	Blanking Delay	0 to 200µS, Step Size 100nS
Transmit/Receive Modes	Pulse Echo and Through Transmission	Rectification	None, Fullwave, +/- Halfwave
<i>Display Specifications</i>		Lowpass Filters - No Filter, .550MHz Lowpass, .850MHz Lowpass, 1.35MHz Lowpass, 2.80MHz Lowpass, 5.50MHz Lowpass, 7.00MHz Lowpass, 10.0MHz Lowpass	
Type	Active TFT Color Display User Interface and Display Integrated into single mode	Highpass Filters - No Filter, .800MHz Highpass, 2.00MHz Highpass, 4.50MHz Highpass, 7.00MHz Highpass, 10.0MHz Highpass	
Size	10.4" diagonal	Transmit/Receive Modes	Pulse Echo and Through Transmission
Additional features	Freeze waveform; save; print	<i>Quantitative Measurements</i>	
Controller		Measurement Modes	Attenuation, Thickness, Velocity, Time-of-Flight, FFT Spectral Analysis
CPU	Pentium 233MHz	General	
Storage	4GB Hard Drive, CD ROM, 3.5" High Density Floppy	Overall Dimensions	Length 23" (584mm), Width 18" (457mm), Height 8.5" (210mm)
Ports	RS232 Serial and Parallel	Weight	40 lbs (25.0kg)
Mouse	Microsoft	Operating Temperature	0° to 105°F (40°C)
Setup Parameter Storage		<i>Data Acquisition</i>	
Max. No. of Stored Setups limited only by hard disk space		Rate	100MHz (realtime) ETS to 800MHz
Software		Peak Detector Gates	8
Operating System	Windows® '95, '98 or NT	Data Gates	8
MUIS32 B- and C-scan Data Collection Software		DAC Dynamic Range	40dB/µS
		DAC Entry	256 Points