

ESTUDO DE UMA NOVA TÉCNICA DE MEDIDA DO TEMPO DE PERCURSO DA
ONDA ULTRA-SÔNICA USANDO O ESPECTRO DE FREQUÊNCIA

Allan Xavier dos Santos

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
REACTORES.

Orientadores: Prof. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt (PPGIEN/CNEN)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2010

SANT Santos, Allan Xavier dos.

Estudo de uma nova técnica de medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica usando o espectro de frequência / Allan Xavier dos Santos – Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2010.

84f.

Orientadores: *Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt*

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2010.

1. Técnicas proposta. 2. Ultra-som. 3. Transformada de Fourier. 4. Domínio da frequência

CDD
CDU

ESTUDO DE UMA NOVA TÉCNICA DE MEDIDA DO TEMPO DE PERCURSO DA
ONDA ULTRA-SÔNICA USANDO O ESPECTRO DE FREQUÊNCIA

Allan Xavier dos Santos

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.: Paulo Victor Rodrigues de Carvalho, D. Sc.
(PPGIEN/CNEN)

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

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

Rio de Janeiro, RJ - Brasil
Abril de 2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família (Sandra, Arlette, José, Alessandra e Alex) por todo o carinho, apoio e amor presentes em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis. A minha namorada Alessandra por todo Amor, compreensão e auxílio com o trabalho e por estar comigo pelos 7 ótimos anos.

Agradeço a Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt 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.

A Carlos Alfredo Lamy por acompanhar de perto o andamento deste trabalho com sugestões e explicações essenciais. Aos funcionários do IEN em especial ao Marcos Santana por te me ajudado e com trabalho e pelo curso que você ministrou tão bem.

Aos amigos de turma e a todos os professores do Programa de Pós-graduação do Instituto de Engenharia Nuclear, por todos os ensinamentos e pela enorme dedicação. Aos meus amigos mais próximos por toda a amizade, companheirismo e auxílio nos momentos de dificuldades, principalmente André Aguiar, Douglas Baroni, Raphael Duarte, Fabrício Caseiro, Carlos Eduardo, Vinicius Martins, Altivo e Rafael Araujo.

Agradeço a família Donato (Gilberto, Carmen e Arthur) por te me acolhido, me apoiado nos momentos difíceis.

Aos professores da engenharia da UERJ Frederico e Alexandre que mesmo sem saber contribuíram de forma significativa para o término deste trabalho.

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

As leis da Natureza nada mais são que pensamentos matemáticos de Deus

(Johannes Kepler)

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

ESTUDO DE UMA NOVA TÉCNICA DE MEDIDA DO TEMPO DE PERCURSO DA
ONDA ULTRA-SÔNICA USANDO O ESPECTRO DE FREQUÊNCIA

Allan Xavier dos Santos

Maio/2010

Orientador: Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt

Programa: Engenharia Nuclear

Durante a operação de uma usina nuclear, assim como de outras plantas industriais, o tempo de operação e a exposição a condições severas podem ocasionar o desgaste de seus componentes, conseqüentemente comprometendo a segurança e o desempenho da instalação. Desta forma, inspeções periódicas tornam-se necessárias para assegurar a segurança e o desempenho da planta.

Assim, a utilização de técnicas ultra-sônicas para inspeção e caracterização de materiais vem se tornando cada vez mais atrativas, pois oferecem resultados rápidos, precisos e são técnicas de fácil implementação. As técnicas ultra-sônicas usuais, necessitam da medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica no material analisado para que se possa extrair informação para caracterizá-lo.

Assim, a medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica é o fator principal na maioria das aplicações que se faz do ultra-som.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma técnica que permite a medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Será mostrado matematicamente e experimentalmente, que é possível utilizar o sinal ultra-sônico no domínio da frequência para determinar o tempo de percurso da onda ultra-sônica. Para a comprovação experimental foram realizados 6 experimentos para validação desta nova técnica. Os materiais utilizados foram 20 pastilhas cerâmica com diferentes porosidades e 3 chapas de alumínio de diferentes espessuras.

Os resultados obtidos mostraram que a técnica proposta neste trabalho foi capaz de determinar o tempo de percurso da onda ultra-sônica com mesmo grau de precisão que a técnica convencional de medida de tempo. Além disso, foi mostrado que essa nova técnica é capaz de medir o tempo de percurso da onda ultra-sônica em situações em que a técnica convencional não pode ser aplicada, possibilitando uma abrangência ainda maior dos ensaios e inspeções por ultra-som.

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

STUDY OF A NEW TECHNIQUE OF MEASURE OF THE TIME OF DISTANCE OF THE
ULTRASONIC WAVE USING THE SPECTER OF FREQUENCY

Allan Xavier dos Santos

April/2010

Advisor: Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt

Program: Nuclear Engineering

During the operation of a nuclear plant and other industrial plants, the operational time and the exposition to severe working conditions may cause the wear of its components, consequently, compromising the safety and the performance of the installation. The implementation of periodical inspections helps to ensure the safe operation and the best performance of the plant.

In this way the use of ultrasonic techniques for inspection and materials characterization becomes more and more attractive, since they offer quick, precise results and are technically ease to implement. The usual ultrasonic techniques, need to the measure the travelling time of the ultrasonic wave in the material examined in order to extract information useful to characterize it. Thus, the measurement of the travelling time of the ultrasonic wave is the overriding factor in most of the applications made with ultrasound.

In this work a new technique was developed for measuring the travelling time of the ultrasonic wave using a Fourier's Fast Transformer (FFT).

It will be shown mathematically and experimentally that it is possible to use the ultrasonic signal in the frequency domain to determine the travelling time of the ultrasonic wave. Five experiments were carried out for the experimental validation of this new technique. The materials used were 20 ceramic pastilles with different porosities and 3 aluminum plates of different thicknesses.

The obtained results have shown that the new technique proposed in this work was able to determine the travelling time of the ultrasonic wave with the same precision as the conventional technique. It was shown, furthermore, that this new technique is able to measure

the travelling time of the ultrasonic wave in situations where the conventional technique cannot be applied greatly expanding the range of application of ultrasonic testing and inspections.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Ultra–Som	4
2.1.1. Princípios físicos do ultra-som	5
2.1.1.1. Ondas longitudinais	7
2.1.1.2. Ondas Transversais	8
2.1.1.3. Velocidade do Som	8
2.2. Transdutores	11
2.3. Processamento de Sinais Digitais	11
2.3.1. Série de Fourier	12
2.3.1.1. Série de Fourier na forma exponencial	13
2.3.2. Transformada de Fourier	15
2.3.3. DFT	17
2.3.3.1. Notação e Formato da DFT	20
2.3.3.2. Funções base	21
2.3.4. FFT (transformada rápida de Fourier)	21
2.3.4.1. Como funciona a FFT	23
3. Metodologia da pesquisa	27
3.1. Ultra – som no domínio do tempo	27
3.2. Ultra – som no domínio da freqüência	30
3.2.1. Determinação do delta f	35
4. Materiais e Experimentos	41
4.1. Generalizações	41
4.2. Materiais	42
4.3. Equipamentos e Métodos	44
4.4. Procedimentos experimentais	48
4.4.1. Primeiro Experimento	48
4.4.2. Segundo Experimento	49
4.4.3. Terceiro Experimento	51
4.4.4. Quarto Experimento	52
4.4.5. Quinto Experimento	54

5. Resultados e discussão	59
5.1. Primeiro experimento	59
5.2. Segundo experimento	66
5.3. Terceiro experimento	74
5.4. Quarto experimento	79
5.5. Quinto experimento	81
6. Conclusão	83
7. Referência Bibliográfica	84
Anexo 1	88
Anexo 2	94
Anexo 3	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Espectro de freqüências sonoras[5]	5
Figura 2:	Propagação da onda longitudinal[6]	7
Figura 3:	Propagação da onda transversal[6]	8
Figura 4:	Transdutor [8]	11
Figura 5:	Espectro da transformada de Fourier no tempo (esquerda) e freqüência (direita)[14]	17
Figura 6 :	Espectro da série de Fourier no tempo (esquerda) e freqüência (direita)[14]	18
Figura 7 :	Espectro da transformada de Fourier de tempo discreto no tempo (esquerda) e freqüência (direita)[14]	18
Figura 8 :	Espectro da transformada discreta de Fourier no tempo (esquerda) e freqüência (direita)[14]	19
Figura 9 :	Decomposição do sinal[11]	19
Figura 10 :	JW Tukey e JW Cooley redescobridores da FFT	21
Figura 11 :	Custo computacional de N adições complexas [11]	22
Figura 12 :	Decomposição do sinal com 16 pontos [12]	23
Figura 13 :	Inversão de bits [12]	24
Figura 14 :	Ganho computacional utilizando a FFT [11]	25
Figura 15 :	Sinal adquirido pela técnica de pulso-eco no domínio do tempo com um transdutor de 5MHz em um metal com a espessura de 10mm [3].	26
Figura 16 :	Sinal ultra-sônico atenuado da pastilha de alumina com 37,30 %de porosidade (a) e 36,80 % (b) [19]	27
Figura 17	Sinal ultra-sônico empacotado da pastilha E2.5 (a) e sinal ultra-sônico empacotado da chapa de alumínio A	28
Figura18 :	Sinal no domínio do tempo da pastilha B2.3 (a) e sinal no domínio da freqüência (b)	30
Figura 19 :	Sinal ultra-sônico no domínio do tempo da pastilha E2.3 (a) e no domínio da freqüência (b)	31
Figura 20:	Sinal ultra-sônico no domínio do tempo da pastilha A1.5 (a) e sinal ultra-sônico no domínio da freqüência (b)	32
Figura 21 :	Sinal no domínio do tempo utilizando transdutor de onda transversal da pastilha C2.4 (a) e sinal no domínio da freqüência (b)	33
Figura 22 :	Determinação dos Δf do sinal no domínio da freqüência da pastilha C2.4	33
Figura 24:	Sinal no domínio do tempo da pastilha C2.5	37
Figura 25 :	Sinal no domínio da freqüência da pastilha C2.5	38
Figura 26 :	Pico 1 e 2 da pastilha C2.5 em destaque	38
Figura 27:	Dados divididos do sinal ultra-sônico destacados	39

Figura 28:	Pico 1 do sinal ultra-sônicos da pastilha C2.5 (a); pico 2(b)	39
Figura 29:	Pastilha cerâmica quadrada, a base de alumina	41
Figura 30 :	Osciloscópio e gerador de sinais ultra – sônicos	43
Figura 31 :	Captura do sinal ultra-sônico com o programa waverstar	44
Figura 32 :	Transdutores ultra-sônicos utilizados nos experimentos	44
Figura 33 :	Tela do programa Chronos	46
Figura 34 :	Determinação do delta de frequência	46
Figura 35:	Sinal no domínio do tempo da pastilha B2.3 (a) e sinal no domínio da frequência (b)	48
Figura 37:	Sinal no domínio do tempo com o pulso inicial da pastilha D1.5 (a) e sem o pulso inicial (b)	49
Figura 38 :	Sinal no domínio da frequência da pastilha D1.5 tomando como base o sinal completo (a) e sinal no domínio da frequência da pastilha D1.5 tomando como base o sinal sem o pulso inicial	49
Figura 39:	Técnica por contato utilizando o transdutor de onda transversal	50
Figura 40 :	Sinal ultra-sônico no domínio do tempo da pastilha E1.5 utilizando o transdutor de onda transversal (a) e sinal ultra-sônico no domínio da frequência(b)	51
Figura 41 :	Chapa de alumínio	52
Figura 42:	Chapas de alumínio	52
Figura 43:	Chapa alumínio de 2,47mm (a) e o sinal ultra-sônico no domínio do tempo da chapa de alumínio de 2,47mm	53
Figura 44:	Tanque de imersão	54
Figura 45:	Trilho do tanque de imersão	55
Figura 46:	Braço mecânico	55
Figura 47:	Suporte para as chapa	56
Figura 48:	Sinal ultra-sônico da chapa de alumínio	56
Figura 49:	Sinal ultra-sônico da chapa B no domínio do tempo no tanque de imersão	56
Figura 50:	Vista expandida do tanque de imersão	57
Figura 51:	Sinal das pastilhas A1.5 (a), E2.3 (b) e E2.5, que receberam **	60
Figura 52:	Velocidade X porosidade com ajuste linear	61
Figura 53:	Medida manual usando os cursores do osciloscópio	62
Figura 54:	Comparação das duas técnicas (experimento 1)	64
Figura 55:	Comparação das duas técnicas (experimento 2)	69
Figura 56:	Sinal no domínio do tempo da pastilha C1.1 (a); sinal no domínio da frequência com o pulso inicial (b) e sem o pulso inicial (c)	73

Figura 57:	Comparação das velocidades no experimento 4	76
Figura 58:	a1(sinal no domínio do tempo da chapa A), a2 (sinal no domínio da frequência da chapa A), b1(sinal no domínio do tempo da chapa A), b2 (sinal no domínio da frequência da chapa B), c1 (sinal no domínio do tempo da chapa A) e c2 (sinal no domínio da frequência da chapa C).	79
Figura 59:	Sinal da chapa B usando o método por imersão no domínio do tempo (a); sinal no domínio da frequência (b)	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 :	propriedades acústicas dos materiais [5]	10
Tabela 2 :	Pastilhas cerâmicas quadradas	41
Tabela 3:	Valores no domínio do tempo referentes ao grupo A	58
Tabela 4:	Valores no domínio do tempo referentes ao grupo B	57
Tabela 5:	Valores no domínio do tempo referentes ao grupo C	57
Tabela 6:	Valores no domínio do tempo referentes ao grupo D	57
Tabela 7:	Valores no domínio do tempo referentes ao grupo E	57
Tabela 8:	Valores estimados da velocidade ultra-sônica no domínio do tempo	62
Tabela 9:	Valores das velocidades ultra-sônicas do grupo E	62
Tabela 10:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo A	63
Tabela 11:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo B	63
Tabela 12:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo C	63
Tabela 13:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo D	63
Tabela 14:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo E	64
Tabela 15:	Diferenças referentes ao grupo A	65
Tabela 16:	Diferenças referentes ao grupo B	65
Tabela 17:	Diferenças referentes ao grupo C	65
Tabela 18:	Diferenças referentes ao grupo D	65
Tabela 19:	Diferenças referentes ao grupo E	66
Tabela 20:	Comparação das velocidades com o cursor e com a técnica proposta	66
Tabela 21:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo A	67
Tabela 22:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo B	67
Tabela 23:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo C	67
Tabela 24:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo D	68
Tabela 25:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo E	68
Tabela 26:	Valores das pastilhas E2.3 e E2.5 encontrados no experimento 1	68
Tabela 27:	Velocidades ultra-sônica no domínio da frequência das pastilhas E2.3 e E2.5	68
Tabela 28:	Diferenças referentes ao grupo A	69
Tabela 29:	Diferenças referentes ao grupo B	70
Tabela 30:	Diferenças referentes ao grupo C	70
Tabela 31:	Diferenças referentes ao grupo D	70
Tabela 32:	Diferenças referentes ao grupo E	70
Tabela 33:	Comparação da velocidade ultra-sônica com o cursor e a técnica proposta	71

Tabela 34:	Comparação dos erros nos experimentos 1 e 2	72
Tabela 36:	Valores no domínio do tempo referentes ao grupo A	73
Tabela 37:	Valores no domínio do tempo referentes ao grupo B	74
Tabela 38:	Valores no domínio do tempo referentes ao grupo C	74
Tabela 39:	Valores no domínio do tempo referentes ao grupo D	74
Tabela 40:	Valores no domínio do tempo referentes ao grupo E	74
Tabela 41:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo A	75
Tabela 42:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo B	75
Tabela 43:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo C	75
Tabela 44:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo D	76
Tabela 45:	Valores no domínio da frequência referentes ao grupo E	76
Tabela 46:	Diferenças referentes ao grupo A	77
Tabela 47:	Diferenças referentes ao grupo B	77
Tabela 48:	Diferenças referentes ao grupo C	77
Tabela 49:	Diferenças referentes ao grupo D	77
Tabela 50:	Diferenças referentes ao grupo E	78
Tabela 51:	Valores das espessuras encontrados a partir da técnica proposta.	80
Tabela 52:	Valores das espessuras encontrados a partir da técnica convencional.	81
Tabela 53:	Valores das espessuras encontrados a partir da técnica proposta	81

1. Introdução

Na operação de uma usina nuclear como a do tipo PWR, com o passar do tempo de operação e a exposição a condições severas, podem ocorrer desgaste dos materiais que compõem a central nuclear, com isso comprometendo sua segurança, seu desempenho e também reduzindo o tempo de vida útil estabelecido no projeto de construção da usina [1][2].

Tais problemas são devido à radiação e a enormes variações de temperatura e pressão normalmente quando a usina nuclear está em operação. Tais variações acarretam corrosão tanto localizada quanto geral, erosão, fragilidade decorrente a variação de calor ou por radiação, ruptura causada pela radiação neutrônica e fadigas [1][2].

Então existe uma enorme importância em conhecer as alterações, detectar e dimensionar possíveis desgastes dos materiais utilizados na usina nuclear, como o gerador de vapor que feito de aços ferrítico, inox, austenítico e aço carbono que são sujeitos a fragilidade térmica e a corrosão [3][4].

Uma forma de inspecionar tais defeitos para que não acarretem mais danos à estrutura dos materiais são os ensaios por ultra-som. É uma técnica não destrutiva utilizada para detecção de defeitos internos dos materiais, para medir espessura, resistência mecânica, conhecer as condições de tensão dos materiais e detecção de corrosão [5][6].

Por isso, o ensaio não- destrutivo por ultra-som, vem como uma boa alternativa para avaliação das características citadas acima. Esta avaliação é realizada emitindo uma onda ultra-sônica no material analisado o retorno desta onda, após interagir com o meio, traz informações que podem ser utilizadas para a detecção e dimensionamento de possíveis desgastes. Tal detecção e dimensionamento são feitos com o cálculo da velocidade de propagação da onda ultra-sônica no material analisado. O cálculo da velocidade ultra-sônica é feito medindo o intervalo do tempo de percurso da onda no meio (distância entre dois ecos consecutivos) [6][7].

Em alguns casos, quando o material possui uma velocidade de propagação muito alta, os intervalos de tempo ficam tão próximos que ocasionam uma dificuldade na determinação deste intervalo de tempo, tornando assim o ensaio muito difícil de ser realizado. Outro problema é quando a onda emitida no material é muito atenuada, dificultando a obtenção do segundo eco, não permitindo a determinação do tempo de percurso da onda ultra-sônica. Estas são condições que dificultam este tipo de análise.

Por estes motivos o Laboratório de Ultra-som do Instituto de Engenharia Nuclear (LABUS/IEN) tem desenvolvido diversos trabalhos utilizando técnicas ultra-sônicas não-convencionais para contornar estes problemas e assegurar as especificações técnicas dos materiais, do ponto de vista tanto de propriedades físicas como mecânicas e metalúrgicas.

A técnica proposta neste trabalho é uma forma alternativa de medir o tempo de percurso da onda ultra-sônica mesmo quando o intervalo de tempo não pode ser determinado utilizando o método de análise convencional (distância entre dois ecos consecutivos). Isso é possível porque a forma de visualizar o sinal ultra-sônico será alterada, deixando de ser no tempo para frequência utilizando uma transformada rápida de Fourier (FFT).

Este trabalho tem como objetivo determinar uma forma de medir a velocidade ultra-sônica a partir do sinal no domínio da frequência. Com a velocidade ultra-sônica pode-se determinar a propriedade elástica e também identificar mudanças na micro-estrutura dos materiais. Tais fatores podem ser utilizados nos ensaios por ultra-som para determinar o envelhecimento dos componentes utilizados em uma usina nuclear típica.

A determinação da velocidade ultra-sônica no domínio da frequência é feita utilizando os intervalos entre os picos de frequência do sinal, como será descrito no decorrer deste trabalho. A FFT transforma o sinal ultra-sônico, no domínio do tempo, em projeções em forma de impulso, no domínio da frequência, e com isso permite uma visualização nítida dos intervalos de frequência. Desta forma contornando as dificuldades de calcular o tempo de percurso da onda ultra-sônica que ocorrem com a técnica convencional.

Para a validação da técnica proposta foram elaborados seis experimentos que consistem em compará-la (técnica proposta) com a técnica convencional. Estes experimentos abrangem situações em que a técnica convencional não permitiu medir o tempo de percurso da onda ultra-sônica. Para os experimentos foram utilizados os métodos por contato com os transdutores de ondas longitudinais e transversais e o método por imersão.

Os materiais utilizados neste trabalho para a validação da técnica foram: 20 pastilhas cerâmicas a base de alumina - com porosidade que variam entre 5,54% a 39,8% - três chapas de alumínio com diferentes espessuras.

Este trabalho foi dividido em 5 etapas, que são :

- 1) Revisão Bibliográfica – Fornece uma visão geral de todas as ferramentas teóricas necessárias para o entendimento do trabalho, como os princípios básicos do ultra-som, tipos de velocidades ultra-sônicas, transdutores, uma breve revisão de processamento de sinais digitais, transformadas de Fourier que é o alicerce de toda teoria matemática utilizada no trabalho, DFT que é a transformada de Fourier que pode ser calculada por um computador e o algoritmo da FFT para realização dos cálculos da DFT centenas de vezes mais rápido.
- 2) Técnica Proposta – Consiste na fundamentação teórica para a técnica ultra-sônica de medida do tempo de percurso pelo domínio da frequência (técnica proposta).
- 3) Materiais e experimentos - Nessa parte são descritos os materiais utilizados no trabalho como também a forma que os sinais são adquiridos.
- 4) Resultados e discussões – Neste tópico são apresentados todos os resultados adquiridos no experimento e assim uma análise será feita para que possa ser avaliado se a técnica propriamente descrita nos itens anteriores esta pronta a ser utilizada como mais uma ferramenta a auxiliar o grupo de pesquisa.
- 5) Conclusão – Trata-se da parte final deste trabalho onde nela serão realizadas ponderações finais sobre o trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Ultra–Som

O ensaio por ultra-som é um método não destrutivo, que se baseia na porção do espectro acústico de alta frequência; as frequências audíveis pelos seres humanos estão entre 20Hz até 20kHz.

As ondas ultra-sônicas são ondas mecânicas que são originadas pela deformação de uma região de um meio elástico e que, para se propagarem, necessitam de um meio material. Por isso as ondas mecânicas não se propagam no vácuo.

Tradicionalmente no ensaio de ultra-som, um emissor induz ondas ultra-sônicas que se propagam através do material a ser analisado. Pelo eco captado no receptor, determina-se a existência ou não de descontinuidades. O ensaio de ultra-som é um dos principais métodos de ensaio não destrutivos aplicados na indústria, porque permite inspecionar todo volume da peça [6].

Vantagens dos ensaios por ultra – som:

Quando comparado aos outros ensaios não destrutivos, o ensaio por ultra-som possui as seguintes vantagens: [5]

- Grande poder de penetração, o qual permite a detecção de descontinuidades em grandes profundidades. O ensaio ultra-sônico é feito rotineiramente em espessuras de centenas de milímetros em diversos tipos de peças e podem-se inspecionar eixos forjados com comprimentos em torno de cinco metros;
- Alta sensibilidade, permitindo a detecção de descontinuidades na ordem de 0,5mm ou menores;
- Precisão maior que a dos outros ensaios não destrutivos na determinação da posição de descontinuidade interna, estimando o seu tamanho e caracterizando sua orientação, forma e natureza;
- Somente é necessário o acesso a uma superfície;
- O equipamento opera eletronicamente, fornecendo indicação instantânea das descontinuidades; isto possibilita a interpretação imediata, automação, rápida varredura, monitoração on-line da produção e controle do processo. Em muitos sistemas pode ser obtido um registro permanente para análise futura;

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

A técnica de ultra-som com ensaios não destrutivos consiste em fazer com que uma onda ultra-sônica emitida por transdutor, percorra o material a ser ensaiado, efetuando a análise dos ecos recebidos, pelo mesmo transdutor ou por outro. O transdutor, também é chamado de cabeçote.

2.1.1. Princípios físicos do ultra-som

Características das ondas ultra-sônicas

As ondas ultra-sônicas consistem nas oscilações de partículas atômicas ou moleculares de uma substância, em sua posição de equilíbrio. Elas se propagam da mesma maneira que as ondas audíveis se propagam em meios elásticos, mas nunca no vácuo. (conforme a figura 1)

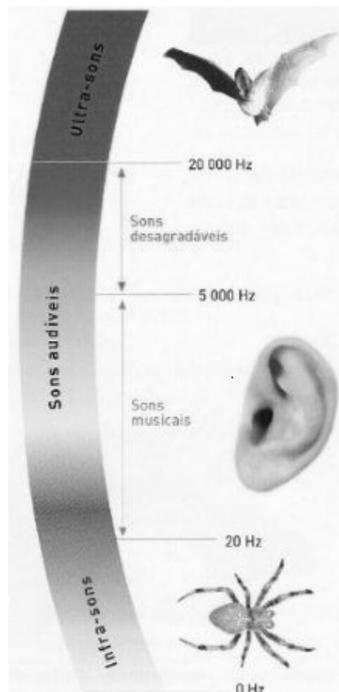


Figura 1: Espectro de frequências sonoras[5]

Os feixes da onda ultra-sônica com uma velocidade (V) característica num meio homogêneo podem ser refletidos e refratados quando passam por meios diferentes.

As ondas ultra-sônicas se propagam nos meios elásticos. Quando as partículas atômicas ou moleculares são removidas de suas posições de equilíbrio por quaisquer forças externas; tensões internas agem para recolocar as partículas em suas posições originais. Em razão das forças interatômicas existentes entre partículas adjacentes; o deslocamento de uma partícula induz a um deslocamento de partículas vizinhas e assim por diante, propagando desta maneira uma onda elástica. O deslocamento real da matéria que ocorre nas ondas ultra-sônicas é ínfimo. Contudo sabemos que o tempo gasto para o ponto vibrar de uma vibração completa é igual a T ou período. O período de uma vibração é medida em segundos; o número de vibrações na unidade de tempo (segundos) chama-se frequência de uma vibração e é igual ao inverso do período conforme a fórmula abaixo:

$$f = 1/T \quad (1)$$

A amplitude, o modo de vibração e a velocidade das ondas diferem nos sólidos, líquidos e gases em função da grande diferença na distância média, entre as partículas. Estas diferenças influenciam as forças de atração entre as partículas e o comprimento elástico dos materiais. [8]

Os conceitos acima como comprimento de onda, frequência, amplitude e velocidade tem como relação à fórmula abaixo:

$$V = f \times \lambda \quad (2)$$

Sendo:

V = velocidade;

f = frequência;

λ = comprimento de ondas;

O modo como se deslocam as partículas no meio classificam as ondas longitudinais e ondas transversais (ondas superficiais e ondas de Lamb, as duas últimas ondas não serão abordadas neste trabalho).

2.1.1.1. Ondas longitudinais

Conhecidas também como ondas de compressão; é o tipo de onda ultra-sônica mais comumente usada na inspeção de materiais. Propagam-se através do material como uma série alternada de compressões e rarefações nas quais as partículas vibram na direção da propagação da onda.

Na figura (2) apresentam uma representação deste tipo de onda.

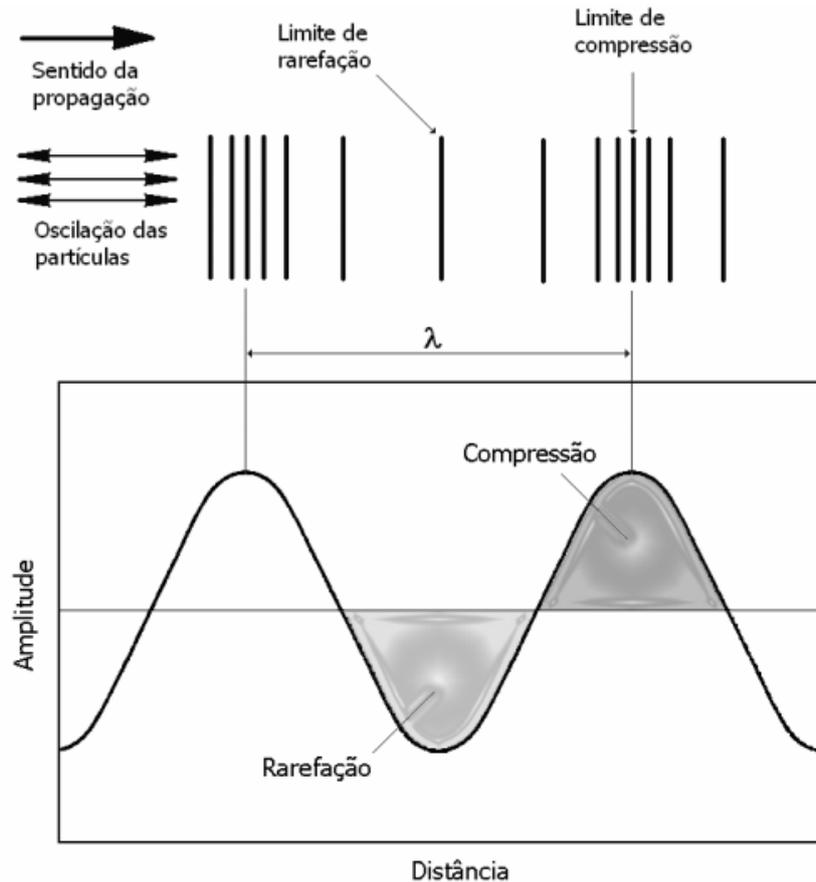


Figura 2: Propagação da onda longitudinal[6]

O eixo vertical pode representar pressão ou deslocamento da partícula e o eixo horizontal pode representar o tempo ou distância, uma vez que a velocidade do som em um determinado material é constante. Esta relação é utilizada nas medidas de velocidade de ultra-som [5]

As ondas longitudinais se propagam com facilidade em meios líquidos, gasosos e sólidos. Nos líquidos e gases as ondas longitudinais se propagam conforme as mudanças nas densidades por causa das colisões entre moléculas com as adjacentes.

2.1.1.2. Ondas Transversais

As ondas transversais seguem a analogia de uma corda vibrando ritmadamente, na qual cada partícula ora vibra para cima ora para baixo no plano perpendicular a direção de propagação. Uma onda transversal está representada na figura 3 que representa esquematicamente as oscilações das partículas, a frente de onda, a direção de propagação da onda e o correspondente comprimento de onda. Ao contrário das ondas longitudinais, a propagação das transversais necessita que as interações entre partículas vizinhas sejam de natureza forte.

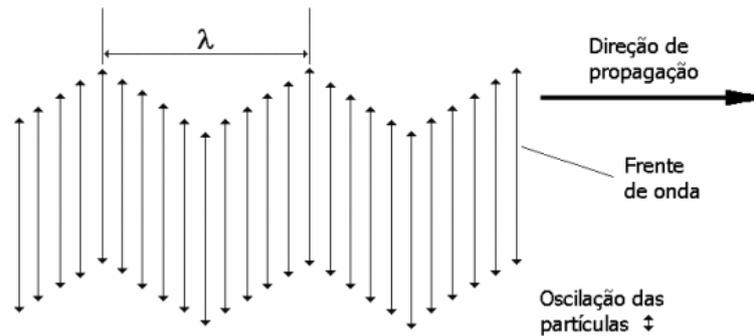


Figura 3: Propagação da onda transversal[6]

A velocidade das ondas transversais são aproximadamente 50% menores que a velocidade das ondas longitudinais no mesmo meio.

2.1.1.3. Velocidade do Som

A velocidade do som pode ser tratada como uma propriedade macroscópica e ser usada para determinar a propriedade elástica e também para identificar mudança na micro-estrutura dos materiais [5].

A velocidade do som está relacionada com o módulo de elasticidade (E) e a densidade do material [5], [9].

$$V = \sqrt{E/\rho} \quad (3)$$

Também de uma forma mais completa, a velocidade do som pode ser determinada pela fórmula:

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (4)$$

$$V_L = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

(5)

Onde:

V_L = velocidade da onda longitudinal (m/s);

V_T = velocidade da onda transversal (m/s);

E = módulo de elasticidade (kg/ms^2);

μ = coeficiente de Poisson;

G = módulo de rigidez (kg/ms^2);

ρ = massa específica (kg/m^3);

Como já fora mencionado, a velocidade do som é constante conforme cada material e também para o tipo de onda independente da frequência e do comprimento de onda como mostra a tabela 1:

Tabela 1: Propriedades acústicas dos materiais [5]

Material	Peso específico kg/m ³	Velocidade transversal m/s	Velocidade longitudinal m/s
Aço carbono	7850	3250	5920
Aço baixa liga	7850	3250	5940
Aço inoxidável (tipo 304L)	7900	3070	5640
Aço inoxidável (tipo 410)	7670	2990	5390
Acrílico (perspex)	1180	1430	2730
Água (gelo)	900	1990	3980
Água (20°C)	1000	-	1480
Alumino	2700	3130	6320
Alumino (óxido)	3600	5500	9000
Bismuto	9800	1100	2180
Bronze	8100	2120	4430
Cádmio	8600	1500	2780
Chumbo	11400	700	2160
Cobre	8900	2250	4700
Concreto	2000	-	4600
Ferro fundido	6900	2200	5300
Ferro fundido cinzento	7200	2650	4600
Glicerina	1300	-	1920
Inconel	8500	3020	5820
Magnésio	1700	3050	5770
Molibdênio	10200	3350	6250
Níquel	8800	2960	5630
Nylon	1100	1080	2620
Óleo automotivo	870	-	1740

2.2. Transdutores

As ondas ultra-sônicas são geradas por transdutores ultra-sônicos. De um modo geral, um transdutor [figura 4] é um dispositivo que converte um tipo de energia em outro tipo. Os transdutores ultra-sônicos convertem energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Esses transdutores utilizam materiais piezoelétricos que apresentam um fenômeno chamado *efeito piezoelétrico*.

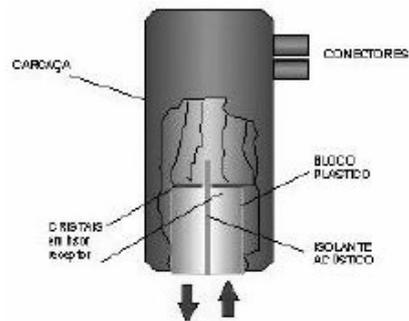


Figura 4: Transdutor [8]

O efeito piezoelétrico é a designação que recebeu o fenômeno que ocorre com os cristais anisotrópicos, nos quais se desenvolvem cargas elétricas quando submetidos a deformações mecânicas. Este fenômeno 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 outras cargas negativas. Experiências diversas mostraram que as cargas elétricas desenvolvidas na lâmina de cristal são proporcionais às cargas mecânicas aplicadas.

Podem-se produzir vibrações mecânicas desde alguns ciclos por segundo (Hertz) até cerca de 25.000.000 (25 MHz) de ciclos por segundo (na maioria das aplicações).

2.3. Processamento de Sinais Digitais

O processamento de sinais digitais consiste no método de analisar sinais do mundo real (representados por uma seqüência de números) usando ferramentas matemáticas, podendo assim realizar transformações ou extrair informações desses sinais [10].

Graças aos grandes avanços em processamento de sinais, tais como o de Cooley e Tukey que escreveram um algoritmo rápido para o cálculo da DFT e com isso, vastas aplicações surgiram como em telefonia celular, entretenimento (DVD), reconhecimento de voz, caracterização da onda ultra – sônica e etc.

Entretanto, nem a natureza nem os seres humanos utilizam sinais digitais para se comunicarem no dia a dia. O mundo real consiste numa infinidade de sinais analógicos, que não são ou não podem ser entendidos em linguagem de máquina. Para que os computadores, celulares ou quaisquer dispositivos eletrônicos possam trabalhar, é necessário que haja um processamento desses sinais analógicos na forma digital [11].

Os sinais tais como o sinal ultra - sônico constituem uma importante fonte de informação. Tradicionalmente estes sinais são investigados através da análise espectral de Fourier. Esse tipo de análise se aplica apenas aos sinais que podem ser classificados como estacionários

2.3.1. Série de Fourier

Na matemática, uma série de Fourier é a representação de uma função periódica, como uma soma de funções periódicas de forma:

$$x \rightarrow e^{jnt}$$

que são harmônicas de e^{it} . Como a fórmula de Euler, a série de Fourier pode ser expressa equivalente em termos de funções seno e cosseno.

Então para uma função $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ é periódica se existir $T \in \mathbb{R}$, $T \neq 0$, tal que $f(t+T) = f(t)$ para todo $t \in \mathbb{R}$. Onde T é chamado de período da função f [12].

Uma função $x(t)$ periódica com período T pode ser expressa pela série trigonométrica de Fourier abaixo:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t \quad (6)$$

onde ω é chamado de frequência fundamental e sabendo que

$$T = 1/f = 2\pi/\omega \text{ e } \omega T = 2\pi. \quad (7)$$

Para provar que a série é periódica com um período da mesma fundamental f , que independe dos valores das amplitudes a_k e b_k , basta mostrar que $x(t) = x(t+T)$ a partir da equação 6 [13].

$$\begin{aligned} x(t+T) &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega(t+T) + b_n \sin n\omega(t+T) = \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t + n\omega T) + b_n \sin(n\omega t + n\omega T) \end{aligned} \quad (8)$$

(7) em (8) resulta em:

$$\begin{aligned}
 x(t + T) &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_k \cos(n\omega t + 2\pi n) + b_k \text{sen}(n\omega t + 2\pi n) = \\
 &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_k \cos n\omega t + b_k \text{sen} n\omega t = \\
 &= x(t)
 \end{aligned}$$

O resultado acima mostra que qualquer combinação de senoíde de freqüência 0, f, 2f, ..., kf é um sinal periódico com período $T=1/f$ independente dos valores das amplitudes a_k e b_k das senoídes [13].

Pode-se verificar que alterando os valores de amplitudes a_k e b_k , constrói –se vários sinais periódicos com mesmo período T, onde $T=1/f$.

Os coeficientes a_k e b_k são chamados de coeficientes da série de Fourier e são determinados pelas equações abaixo:

$$\begin{aligned}
 a_k &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos(2\pi nft) dt \\
 b_k &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \text{sen}(2\pi nft) dt
 \end{aligned} \tag{9}$$

2.3.1.1. Série de Fourier na forma exponencial

A série de Fourier trigonométrica pode ser colocada na forma exponencial complexa usando a igualdade de Euler. Pra isso, utilizam-se os termos senos e cossenos na forma exponencial isto é:

$$\begin{aligned}
 \text{sen}(2\pi\omega t) &= \frac{1}{2j} \{e^{j2\pi\omega t} - e^{-j2\pi\omega t}\} \\
 \cos(2\pi\omega t) &= \frac{1}{2} \{e^{j2\pi\omega t} + e^{-j2\pi\omega t}\}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Substituindo a equação (10) acima na fórmula trigonométrica (6), se obtém:

$$\begin{aligned}
x(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{a_k}{2} [e^{j2\pi wnt} - e^{-j2\pi wnt}] + \frac{b_k}{2j} [e^{j2\pi wnt} - e^{-j2\pi wnt}] \right\} = \\
&= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{a_k - jb_k}{2} e^{j2\pi wnt} + \frac{a_k + jb_k}{2} e^{-j2\pi wnt} \right\} =
\end{aligned}$$

$$\begin{cases}
A_0 = \frac{a_0}{2}, n=0 \\
A_n = \frac{a_k - jb_k}{2}, n > 0 \\
A_{-n} = \frac{a_k + jb_k}{2}, n < 0
\end{cases}$$

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{A_n e^{j2\pi wnt} + A_{-n} e^{j2\pi wnt}\} =$$

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \{A_n e^{j2\pi wnt}\}$$

(11)

2.3.2. Transformada de Fourier

A transformada de Fourier (FT) tem como base a descoberta que ocorreria por volta de 1800, pelo matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier, que fornecera uma vasta gama de pesquisas matemáticas realizadas nos séculos XIX e XX.

O conceito da transformada de Fourier é que uma função arbitrária, mesmo contendo descontinuidades, poderia ser expressa por uma função analítica. Com essa

afirmação ocorreram muitas constatações por parte dos grandes matemáticos da época, tais como: Biot, Laplace e Poisson.

Graças às suas pesquisas que terminaram por fornecer o alicerce para muitos avanços na matemática, ciência e engenharia. A característica da transformada de Fourier, que a torna uma valiosa ferramenta de análise é a habilidade para decompor qualquer função periódica, tais como sinais resultantes de sensores que captam vibrações do cristal do transdutor ou um sinal sonoro complexo, em uma série de funções de uma base ortonormal, composta por senos e cossenos. Os coeficientes destas funções da base ortonormal representam a contribuição das componentes de seno e cosseno do sinal em todas as frequências. Isso possibilita a análise do sinal em termos de suas componentes de frequência [14].

Uma grande desvantagem da transformada de Fourier é quando a função que rege o sinal não é periódica, pois se torna impossível escrevê-la como combinação linear de uma família de senos e cossenos harmonicamente relacionados.

A equação (12) permite transformar um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, enquanto a equação (13) transforma um sinal no domínio da frequência para o domínio do tempo.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (12)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (13)$$

Em alguns casos (como o ultra-som) quando o sinal no domínio do tempo for uma função periódica, a transformada de Fourier pode ser expressa por uma série de Fourier,

$$x_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_k e^{j2\pi ft} \quad (14)$$

Onde o coeficiente a_k é calculado pela equação abaixo:

$$a_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x_T(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (15)$$

Então a transformada de Fourier da série de Fourier pode ser calculada desta forma:

$X_T(f) = F\{x_t(t)\}$, logo:

$$X_T(f) = F\left\{\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_k e^{j2\pi ft}\right\} \quad (16)$$

Então resolvendo a equação (16) acima temos,

$$X_T(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_k F\{e^{j2\pi ft}\} \quad (17)$$

Realizando a transformada de $x(t)$ onde $x(t) = e^{j2\pi ft}$ temos

$$X_T(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e^{j2\pi f_0 t} e^{-j2\pi ft} dt =$$

Colocando o expoente f e f_0 em evidência e resolvendo a integral, temos:

$$\begin{aligned} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e^{-j2\pi(f-f_0)t} dt = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{-1}{j2\pi(f-f_0)} \left\{ e^{-j\pi(f-f_0)t} - e^{j\pi(f-f_0)t} \right\} = \end{aligned}$$

Chamando $e^{-j\pi(f-f_0)t}$ de (-a) e $e^{j\pi(f-f_0)t}$ de (a) e resolvendo o termo que esta dentro do parênteses pela lei dos cossenos obtêm-se:

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} T \text{sinc} \left[(f-f_0)T \right] =$$

Como será visto à frente $\text{sinc}(c) = 1$. Então a equação acima fica:

$$= X_T(f) = \delta(f-f_0)$$

Logo,

$$X_T(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_k \delta(f - f_0) \quad (18)$$

Isto significa que a transformada de Fourier de um sinal periódico consiste em impulsos (δ) localizados nas freqüências harmônicas do sinal, sendo que a amplitude de cada impulso corresponde a coeficientes da série exponencial [12][15].

2.3.3. DFT

A transformada discreta de Fourier (DFT) faz parte da análise de Fourier, que é uma família de técnicas matemáticas, baseada em decomposição de sinais e em senóides e cossenóides. A transformada discreta de Fourier é o membro da família que utiliza sinais digitalizados.

O termo transformada de Fourier pode ser dividido em quatro categorias que representam resultados em quatro tipos básicos de sinais que podem ser encontrados quando estudamos os sinais.

O sinal pode ser contínuo ou discreto e por sua vez ser aperiódico ou periódico. As combinações destes dois elementos geram as quatro categorias da família de análise de Fourier. Essas variedades de casos constituem a base da definição da transformada de Fourier.

1º) Sinal contínuo aperiódico – esses sinais se estendem tanto do positivo como ao negativo infinito, sem se repetir em um padrão periódico. Este tipo de sinal é chamado de transformada de Fourier (FT).

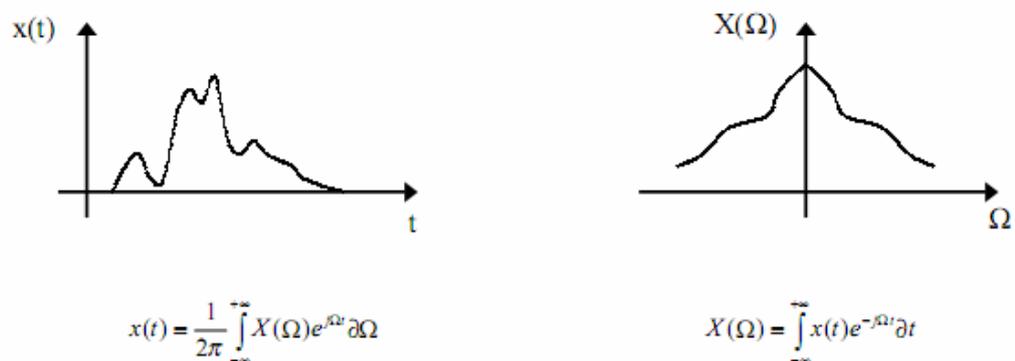


Figura 5: Espectro da transformada de Fourier no tempo (esquerda) e freqüência (direita) [14]

2º) Sinal contínuo periódico – o espectro desse sinal se repete com um padrão regular com infinitos termos que se estende do negativo até o positivo. Este tipo de sinal é chamado de série de Fourier (FS).

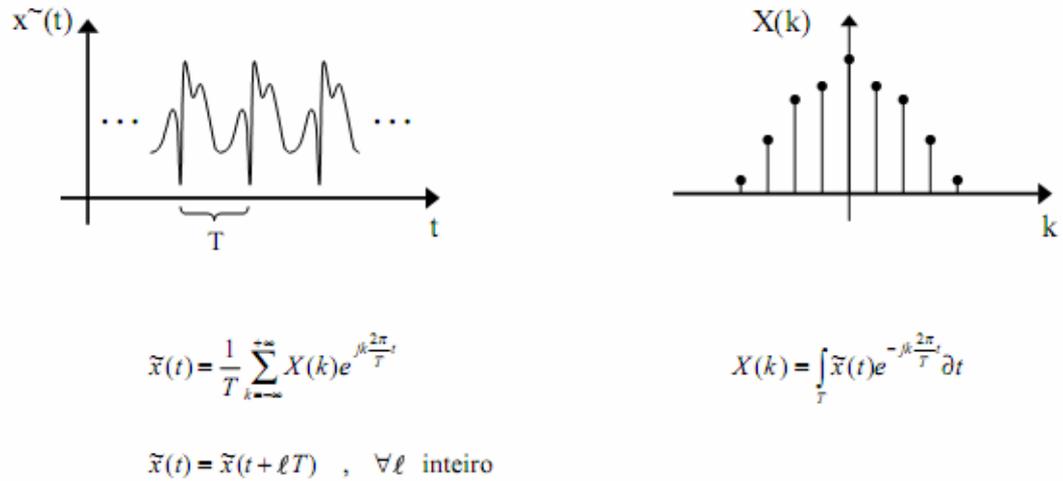


Figura 6: Espectro da série de Fourier no tempo (esquerda) e frequência (direita) [14]

3º) Sinal discreto aperiódico – estes sinais são definidos com pontos discretos entre o infinito positivo até o infinito negativo, mas não se repete com uma forma periódica. Este tipo de sinal é chamado de transformada de Fourier de tempo discreto (DTFT).

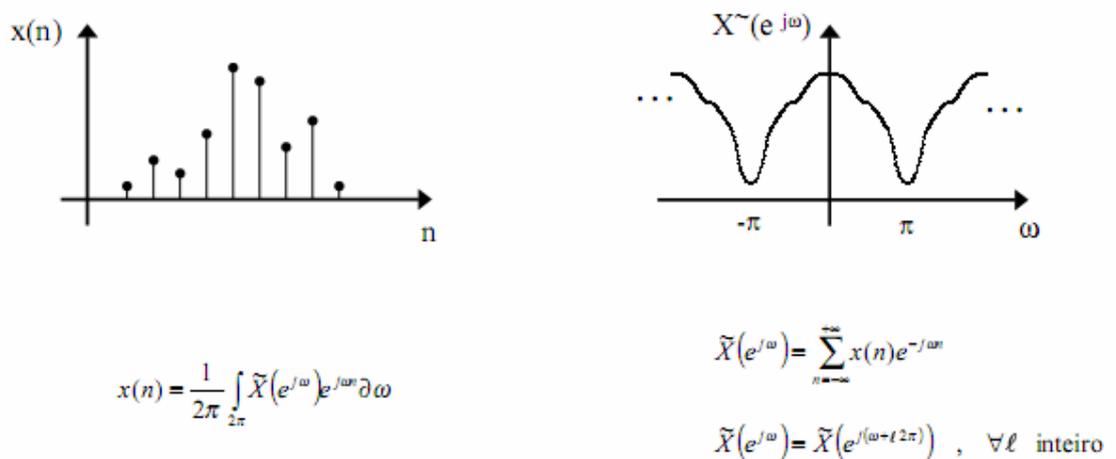


Figura 7: Espectro da transformada de Fourier de tempo discreto no tempo (esquerda) e frequência (direita) [14]

4º) Sinal discreto periódico – o espectro deste sinal é descrito como uma série de Fourier periódica e com N pontos e cujos termos se associam a exponenciais complexas

de frequências harmônicas da frequência fundamental. Este sinal é chamado de transformada discreta de Fourier (DFT).

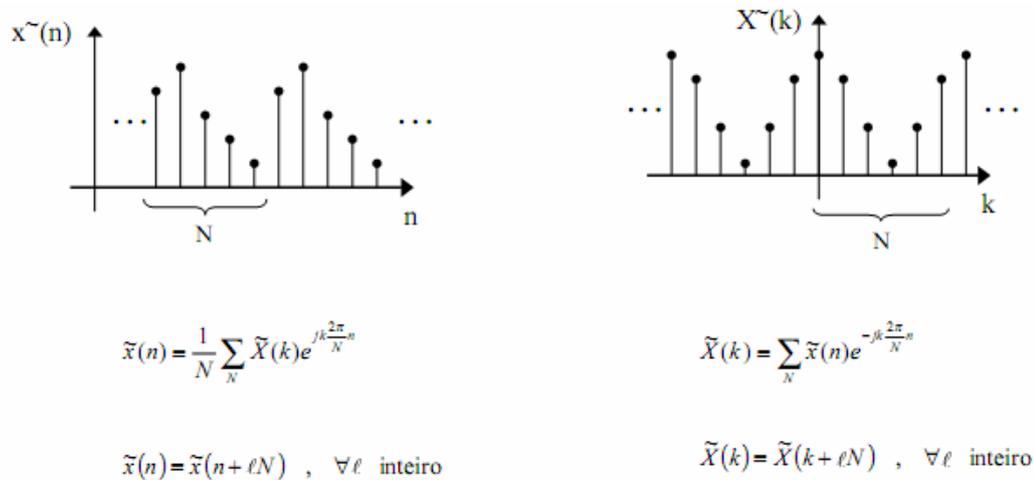


Figura 8: Espectro da transformada discreta de Fourier no tempo (esquerda) e frequência (direita) [14]

Todas as quatro formas diferentes da transformada se estendem até o infinito, o que se torna impossível de analisar em um computador, pois ele (o computador) necessita que os dados estejam com duração finita. Com isso impossibilita o uso da DTFT, pois são necessárias infinitas senóides e também é necessário que os dados estejam na forma digital (discretos). Em outras palavras, o computador só pode trabalhar com informações que sejam *discretas* e *finitas* de comprimento [14].

2.3.3.1. Notação e Formato da DFT

Como verificamos na figura 9, a transformada discreta de Fourier altera um sinal de entrada com N pontos em dois sinais de saída com N/2+1 pontos cada. O sinal de entrada é o sinal a ser decomposto enquanto os sinais de saída contêm as amplitudes dos componentes do seno e do cosseno a ser analisadas. O sinal de entrada no nosso caso esta no domínio do tempo enquanto os sinais de saída estão no domínio da frequência.

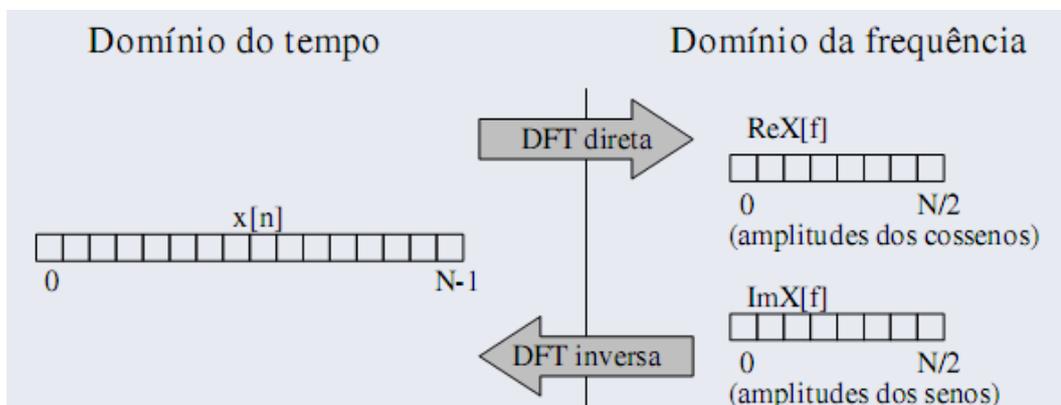


Figura 9: Decomposição do sinal [11]

Quando se fala no domínio do tempo em análise de Fourier quer dizer que são amostras colhidas ao longo de um tempo. O domínio da frequência é o termo usado para descrever as amplitudes das ondas seno e cosseno [13].

O domínio da frequência contém exatamente as mesmas informações que no domínio do tempo, mas de forma diferente. Então conhecendo um dos domínios podemos calcular o outro.

Do quarto caso (DFT) é possível verificar que são necessários N pontos no domínio discreto no tempo n, do que no domínio discreto da frequência k, para descrever completamente um período do sinal [11].

As amostras no domínio do tempo são representadas por N pontos variáveis. Enquanto pode ser qualquer inteiro positivo, normalmente são usados potência de 2. Existem duas razões para usarmos potência de 2, a primeira é por causa que o computador trabalha com base binária e a outra razão é por causa da FFT (transformada rápida de Fourier) que é um algoritmo engenhoso para cálculos da DFT de maneira centenas de vezes mais rápida. A FFT será abordada mais a frente.

Quanto maior o numero de pontos o sinal tiver, mais discretizado o sinal será e mais definido se torna o sinal gerado pela transformada discreta de Fourier [16].

2.3.3.2. Funções base

O seno e o cosseno do sinal da DFT são chamados de funções de base DFT. As funções de base são um conjunto de ondas de senos e cossenos em unidades de amplitude. Se atribuímos cada amplitude (domínio da frequência) para cada seno adequado ou cosseno (funções base), o resultado é um conjunto de ondas seno e cosseno que pode ser adicionado para formar o sinal no domínio do tempo [11].

As funções de base são representadas pelas equações:

$$C_k[i] = \cos(2\pi ki / N) \quad (19)$$

$$S_k[i] = \sin(2\pi ki / N) \quad (20)$$

Onde:

$C_k[i]$ - parte real

$S_k[i]$ - parte imaginária

2.3.4. FFT (transformada rápida de Fourier)

A transformada rápida de Fourier (do inglês Fast Fourier Transform – FFT) é um algoritmo eficiente para computar a transformada discreta de Fourier [14].

A FFT é de grande importância para uma variedade de aplicações, dentre essas aplicações podemos citar o processamento de imagens, a resolução de equações diferenciais parciais, a caracterização de padrões de sinais ultra – sônicos, entre outras aplicações.

A transformada rápida de Fourier também chamada de algoritmo Cooley – Tukey. JW Tukey e JW Cooley (figura 10) receberam muitos créditos por descobrirem a FFT, no momento certo, no início da revolução da informática, pois em retrospectiva, outros matemáticos já tinham descoberto a técnica muitos anos antes que Cooley – Tukey. Por exemplo, o matemático alemão Karl Friedrich Gauss (1777 – 1855) usou este método um século antes. Mas este trabalho ficou inviável por falta de ferramentas para torná – lo prático.



Figura 10: JW Tukey e JW Cooley redescobridores da FFT

O princípio básico da FFT é a realização do cálculo de uma dada DFT de comprimento N, com base em DFTs de comprimento mais curto, através de uma decomposição da seqüência de entrada que designa de decimação no tempo (decimation in time DIT) ou da seqüência de saída que designa de decimação na freqüência (decimation in frequency DIF), tirando proveito das propriedades de simetria e periodicidade [12].

Para o cálculo direto da DFT é utilizado a equação abaixo:

$$\mathbf{x}(\mathbf{k}) = \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{x}(n) \mathbf{W}_N^{kn}, \mathbf{k} = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (21)$$

Então $x(n)$ e $X(K)$ sendo complexos, conclui – se que o número de operações aritméticas envolvidas nos cálculos da DFT é:

* multiplicações complexas $N^2 = 4N^2$ **multiplicações reais** + $2N^2$ **adição**

* adição complexas $N(N - 1) = 2N(N - 1)$ **adições reais**

O que nos leva a concluir que a DFT é proporcional a N^2 , com isso os cálculos da DFT se tornam complicados, pois se N for muito grande, o custo computacional se torna muito grande também conforme podemos verificar na figura 11 abaixo:

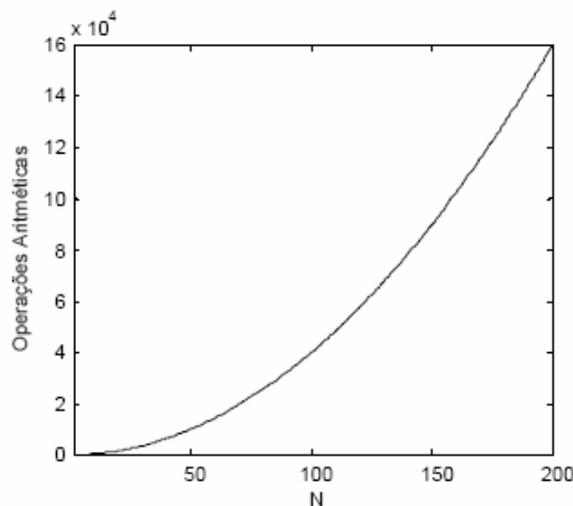


Figura 11: Custo computacional de N adições complexas [11]

2.3.4.1. Como funciona a FFT

Para a realização do algoritmo da transformada rápida de Fourier, os sinais no domínio do tempo são divididos em três passos.

A FFT opera através de decomposições de um ponto N do sinal no domínio do tempo em N domínios do tempo, onde os sinais de cada uma das decomposições são compostos por um único ponto. O segundo passo é calcular os espectros de frequência N correspondentes a estes sinais do domínio N tempo. Por último, os espectros de N são sintetizados em um espectro de frequência única [12].

A figura abaixo ilustra um exemplo do primeiro passo para o cálculo da FFT que é a decomposição do sinal no domínio do tempo. O sinal em questão possui 16 pontos e é dividido em quatro fases. Na primeira fase de decomposição o sinal é dividido em

dois, cada parte é composta por 8 pontos, repare que o sinal é separado em partes, uma só com os pontos pares e uma outra parte só com os pontos ímpares. Na segunda etapa da decomposição o sinal é novamente dividido em 2 partes, cada parte com 4 pontos cada (repare que a divisão de pares e ímpares continua). Este processo continua até que só haja N sinais constituídos por apenas um ponto.

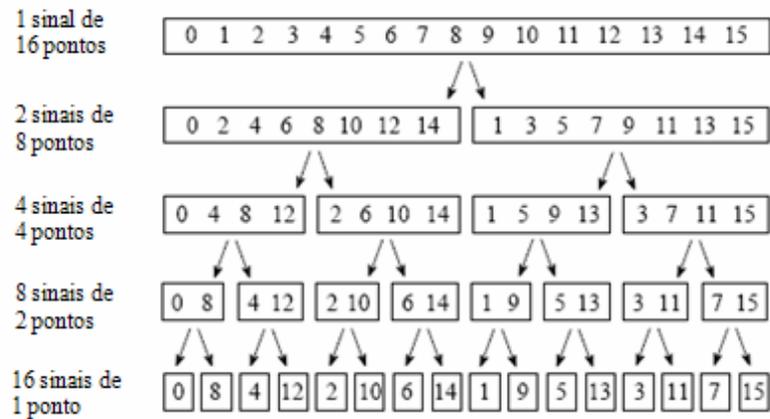


Figura 12: Decomposição do sinal com 16 pontos [12]

O processo de decomposição é na verdade um reordenamento das amostras do sinal no domínio do tempo. A decomposição sucessiva do sinal corresponde em separar os dados em índices pares e ímpares (como já foi dito acima); logo após a decomposição acontece um reordenamento dos dados. Essa reordenação tem a particularidade de poder exprimir a representação binária da ordem de entrada, por meio de uma inversão de ordem dos bits. Por exemplo, a amostra 3 (0011) é trocada pela amostra de número 12 (1100), da mesma forma que a amostra de número 14 (1110) é trocada pela amostra de número 7 (0111), o nome dessa inversão é bit – reversal (figura 13)[11],[12]e [17].

Números simples em ordem normal			Números simples depois do bit reversal	
Decimal	Binário		Decimal	Binário
0	0000	→	0	0000
1	0001		8	1000
2	0010		4	0100
3	0011		12	1100
4	0100		2	0010
5	0101		10	1010
6	0110		6	0100
7	0111		14	1110
8	1000		1	0001
9	1001		9	1001
10	1010		5	0101
11	1011		13	1101
12	1100		3	0011
13	1101		11	1011
14	1110		7	0111
15	1111		15	1111

Figura 13: Inversão de bits [11]

A etapa seguinte da FFT é encontrar os espectros de frequência de 1 ponto no domínio N tempo. O que nos leva a conclusão que o ponto é igual a si próprio (por causa de reversão de bits), com isso não teremos nada a fazer.

A última etapa é reconstruir o sinal no domínio da frequência. Para reconstruir o sinal, basta combinar os espectros de frequência de N na ordem contrária que a decomposição do domínio do tempo ocorreu.

Com isso o custo computacional da DFT calculada pelo algoritmo da FFT cai de N^2 para $N \cdot \log_2 N$, o que representa um ganho computacional de $N/\log_2 N$, ou seja, menos cálculos computacionais e com isso gera maior agilidade, como mostra a figura 14.

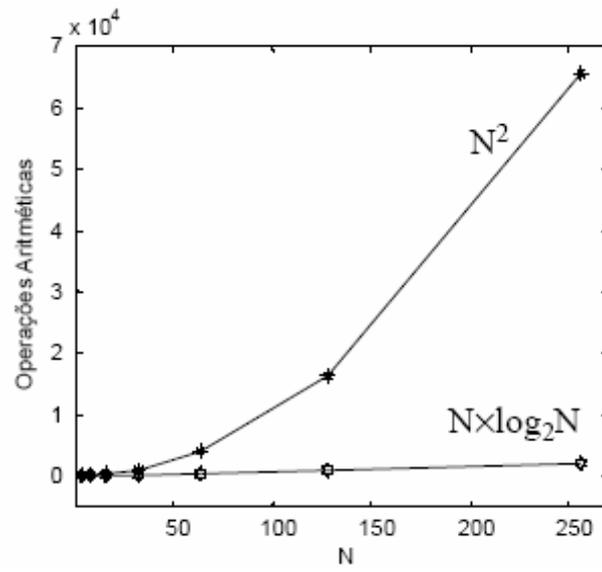


Figura 14: Ganho computacional utilizando a FFT [17]

3. Técnica Proposta

3.1. Ultra – som no domínio do tempo

As técnicas por ensaios não destrutivos por meio de ultra – som tem sido cada vez mais aprimoradas em diversas áreas de atuações devido as inúmeras aplicações e facilidades de implementações, como foi introduzido na seção 2.1.

Na maioria das aplicações industriais o ultra-som é utilizado para detecção e dimensionamento de descontinuidade, medindo o tempo de percurso da onda ultra – sônica no material analisado. O tempo de percurso da onda ultra-sônica corresponde ao intervalo entre dois ecos consecutivos (figura 15). Outra aplicação de uso específico utilizando ensaio por ultra-som é a caracterização dos materiais cerâmicos usando a velocidade ultra-sônica medindo o tempo de percurso do pulso sônico, que está relacionado com a sua porosidade (material cerâmico). Nesse trabalho, o método de determinação do intervalo de tempo entre dois ecos consecutivos é denominado de técnica convencional.

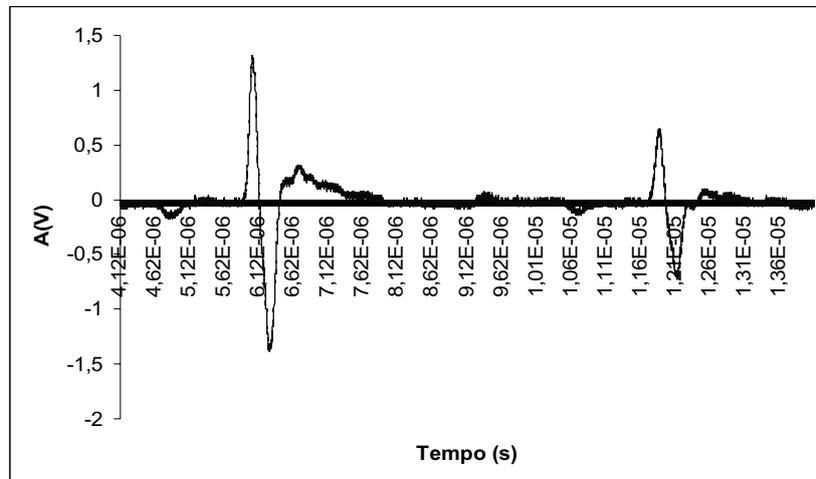


Figura 15: Sinal adquirido pela técnica de pulso-eco no domínio do tempo com um transdutor de 5MHz em um metal com a espessura de 10mm [18].

A determinação da velocidade do sinal ultra-sônico é obtida a partir da relação abaixo:

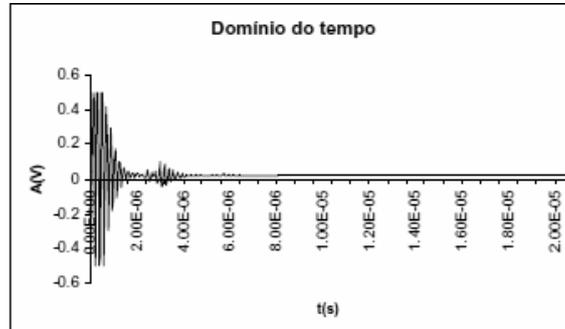
$$V = 2S/T \tag{22}$$

Onde V é a velocidade da onda ultra-sônica; S é a espessura do material analisado e T é o tempo de percurso que é determinado pela distância entre dois ecos consecutivos.

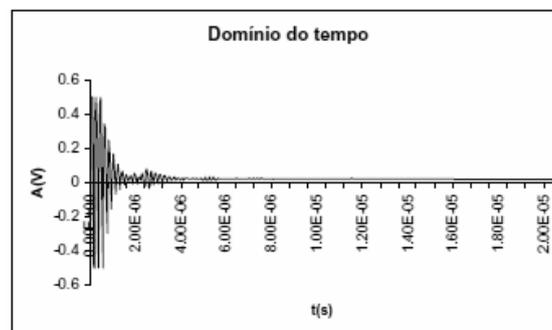
Cabe informar que o pulso ultra-sônico emitido pelo cristal do transdutor, percorre a espessura do material analisado e reflete nas interfaces formadas no fundo do material e na superfície, sempre ocorrendo de forma contínua, o sinal vai e volta [6].

Para cada incidência do sinal do ultra-som na superfície do transdutor, após a reflexão do sinal no interior do material, um eco correspondente a esta reflexão será visualizado no equipamento ultra-sônico, formando o sinal no domínio do tempo. Portanto, em um pulso ultra-sônico em geral é possível observar vários ecos correspondentes as reflexões de fundo.

Em certos tipos de materiais (Ex: cerâmicos a base de alumina), dependendo da sua densidade, ocorre uma forte atenuação do sinal; o que pode dificultar a determinação dos ecos como mostra a figura abaixo. Cabe informar que neste trabalho foi utilizado como um dos materiais pastilhas cerâmicas a base de alumina como será visto no tópico 4.2.



(a)



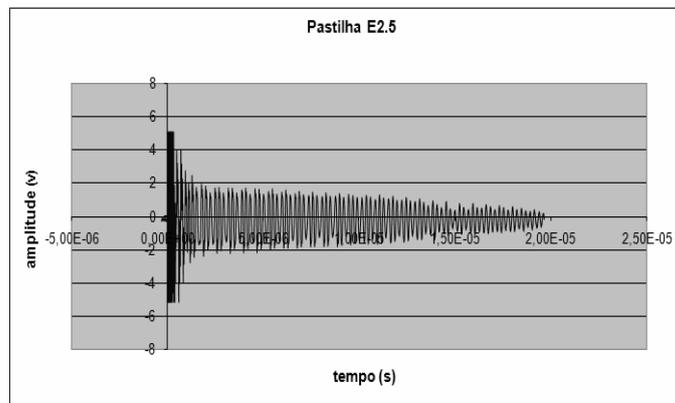
(b)

Figura 16: Sinal ultra-sônico atenuado da pastilha de alumina com 37,30 % de porosidade (a) e 36,80 % (b) [19]

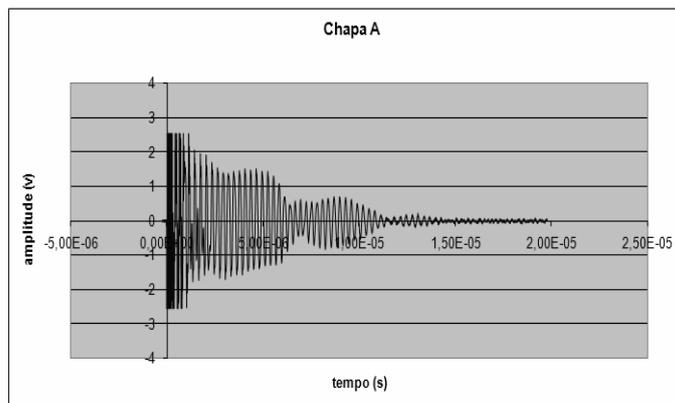
Então quando o material é pouco denso (muito poroso) causa dificuldade da passagem do sinal ultra-sônico, isso é explicado pelo fato de que o sinal ultra-sônico é influenciado pelas características do material em que se propaga como, por exemplo, o módulo de elasticidade e a densidade do material [9].

Outro motivo que dificulta a medição do tempo de percurso do sinal do ultrassom é quando o material tem espessura reduzida, ocorrendo uma sobreposição dos ecos correspondentes as reflexões de fundo, com isso não permitindo a seleção dos ecos para a medição.

Esta sobreposição dos ecos (figura 17) pode ser explicada porque o cristal piezoeletrico (cristal que compõem o transdutor) após emitir o pulso recebe a resposta do sinal ultra-sônico que percorre o material analisado em um espaço curto de tempo, pois a espessura é muito fina, assim acaba não ocorrendo tempo suficiente para que o eco correspondente a este sinal seja identificado no aparelho ultra-sônico antes da próxima emissão. Com isso os ecos ficam muito próximos uns dos outros, impossibilitando defini-los e realizar a medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica [6].



(a)



(b)

Figura 17: Sinal ultra-sônico pastilha E2.5 (a) e sinal da chapa de alumínio A(b)

Na figura 15 podemos perceber que é muito fácil determinar a distância entre os ecos, por outro lado, se torna difícil a determinação dos ecos da figura 17, pois os ecos estão muito próximos, sendo difícil determinar dois ecos consecutivos.

Devido a essas dificuldades (sinais sobrepostos e atenuados) o grupo de pesquisas do laboratório de ultra-som do Instituto de Engenharia Nuclear (LABUS) está desenvolvendo técnicas para a determinação do tempo de percurso da onda ultra-sônica.

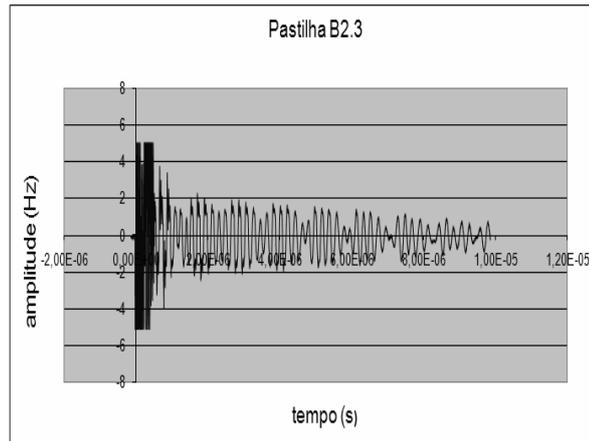
Neste trabalho será apresentado o desenvolvimento de uma técnica alternativa de determinação do tempo de percurso da onda ultra-sônica utilizando o sinal ultra-sônico por outra abordagem; não só medindo o tempo de percurso pela distância entre dois ecos consecutivos, mas sim com outro método de análise de sinais, utilizando a transformada rápida de Fourier (FFT).

3.2. Ultra – som no domínio da frequência

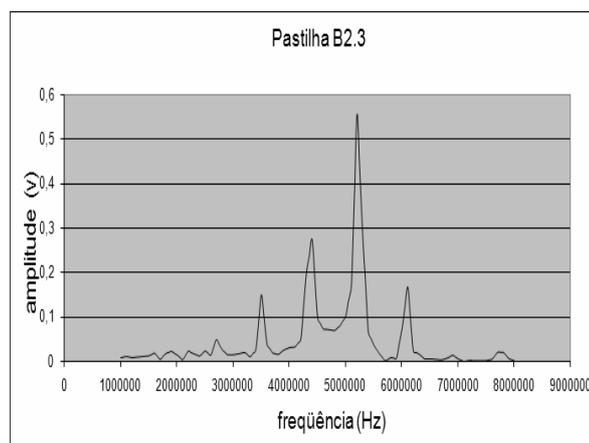
Tendo em vista as dificuldades, utilizando a medida do tempo de percurso do sinal ultra-sônico apresentado no tópico anterior (sinal ultra-sônico sobreposto e sinal atenuado), foi necessário outra abordagem para alcançar o objetivo deste trabalho que é o desenvolvimento de uma técnica alternativa para determinar o tempo de percurso da onda ultra-sônica. Para isso foi necessário uma nova forma de visualizar o sinal ultra-sônico agora não mais no domínio do tempo (técnica convencional), mas sim no domínio da frequência o que acarreta outra forma de apresentar o sinal.

O ato de passar o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência traz a vantagem de visualização do sinal de outra forma e com outras informações como, por exemplo, ângulo de fase, frequência e amplitude de frequência.

A representação nos domínios pode ser imaginada como a projeção de senóide em cada um deles. No domínio do tempo a forma de onda assume o aspecto já conhecido sendo bem determinada pela sua amplitude e seu período, mas como mencionado anteriormente mesmo bem definido os ecos podem ficar sobrepostos dificultando a sua determinação. No domínio da frequência a projeção da senóide assume a forma de impulso (pulso com tempos de subida e de descida instantâneos) como pode ser analisado na figura 18 abaixo [12].



(a)



(b)

Figura 18: Sinal no domínio do tempo da pastilha B2.3 (a) e sinal no domínio da frequência (b)

Observando a figura 18 é verificado que no sinal ultra-sônico no domínio da frequência possui espectro bem definido, mas no domínio do tempo, a identificação dos ecos torna-se prejudicada pelo intervalo de tempo muito curto entre eles.

A técnica matemática que permite a visualização do sinal ultra-sônico no espectro de frequência foi desenvolvida por Jean Baptiste Joseph Fourier. Segundo ele “qualquer função periódica, por mais complicada que seja, pode ser representada como a soma de várias funções, seno e cosseno com amplitudes, fases e períodos escolhidos convenientemente” [12].

Um sinal ultra-sônico no domínio do tempo com um período T pode ser expresso no domínio da frequência por uma série trigonométrica da forma.

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{n_0} a_n \cos(kwt) + b_n \sin(kwt) \quad (23)$$

onde $f = 1/T$ que tem o nome de frequência fundamental.

Outra forma de representar o sinal no domínio da frequência é colocá-lo na forma exponencial.

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \{A_n e^{j2\pi wnt}\} \quad (24)$$

A maior vantagem de utilizar o domínio da frequência ao visualizar o sinal ultra-sônico é que quanto mais sobreposto o sinal do domínio do tempo estiver - o que remete mais pacote de dados com isso mais ecos - o sinal se torna melhor definido na frequência, como pode ser visualizado na figura 19(a) e 19(b). O que significa que quando o sinal no domínio do tempo fica com os ecos sobrepostos não é possível obter a informação necessária para a determinação da velocidade ultra-sônica com a técnica convencional, pois a determinação do intervalo entre os ecos torna-se impraticável, já no domínio da frequência a forma do sinal se torna bem definida com intervalos fixos como será visto mais a frente o que facilita o processo de obtenção dos dados necessário para a utilização da técnica proposta neste trabalho [12]

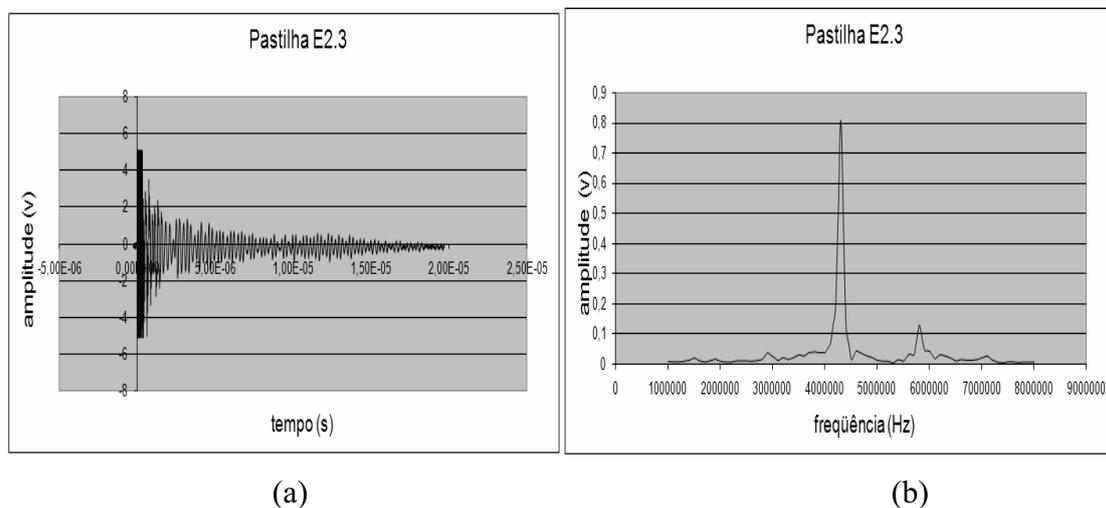


Figura 19: Sinal ultra-sônico no domínio do tempo da pastilha E2.3 (a) e no domínio da frequência (b)

Observando a figura 19(a), verifica-se que não é possível distinguir os intervalos ecos, enquanto, na figura 19(b) mostra nitidamente que os picos de frequência estão bem definidos possibilitando a obtenção das informações necessárias para a utilização da técnica proposta.

Mesmo o sinal no domínio do tempo tendo poucos dados, com o uso desta técnica - de passar o sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência – a técnica proposta é capaz de fornecer a distinção entre os picos de frequência, que é a informação necessária para o uso desta técnica, pois na construção do sinal no domínio da frequência (como será visto no tópico 3.2.1) é utilizada a frequência fundamental para a sua construção - como pode ser visto na figura 20(a) e 20(b). Com isso até não possuindo uma quantidade significativa de informações o sinal no domínio do tempo permite que a transformada para o domínio da frequência tenha um padrão periódico.

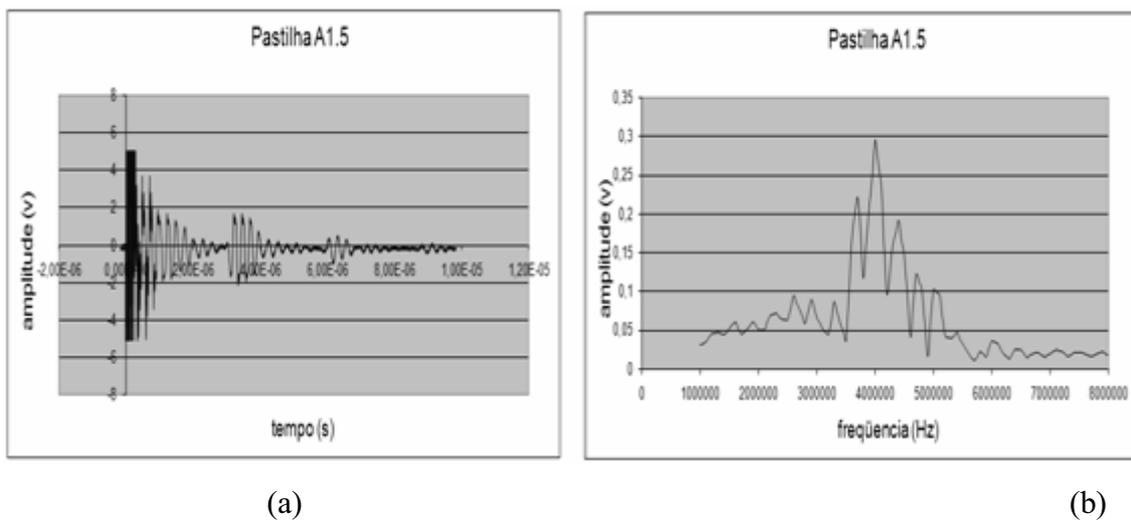


Figura 20: Sinal ultra-sônico no domínio do tempo da pastilha A1.5 (a) e sinal ultra-sônico no domínio da frequência (b)

No decorrer do trabalho será visto que os sinais periódicos no tempo contínuo ou discreto - no caso o sinal ultra-sônico - possuem representações, pela família de Fourier, dada pela soma ponderada de senóide complexa com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental [13][20].

Cabe informa que o membro da família de Fourier aplicado neste trabalho foi à transformada discreta de Fourier (DFT), que é uma seqüência de dados discretizados e periódicos, proveniente da transformada de Fourier no caso que os dados no domínio do tempo são periódicos. Como já foi visto anteriormente no tópico 2.3.3, a DFT possui uma forma bem mais rápida de se calcular que é denominada transformada rápida de Fourier. A figura 21 mostra o sinal da pastilha C2.3 no domínio do tempo (a) e a sua FFT correspondente (b) que mostra a definição dos picos de frequência.

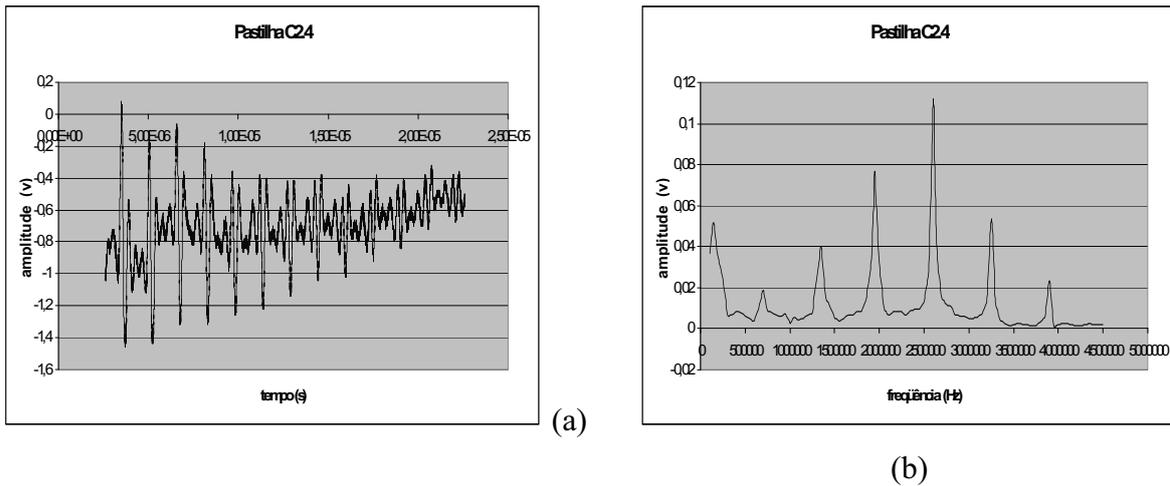


Figura 21 : Sinal no domínio do tempo utilizando transdutor de onda transversal da pastilha C2.4 (a) e sinal no domínio da frequência (b)

Os espaçamentos entre cada pico do sinal ultra-sônico no domínio da frequência serão denominados de Δf . Esses Δf possuem mesmos valores graças a propriedade de periodicidade (ver tópico 3.2.1.1) como pode ser observado na figura 22.

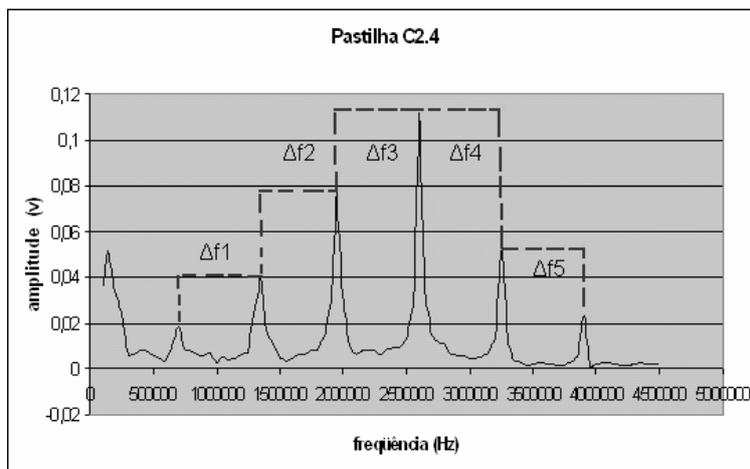


Figura 22: Determinação dos Δf do sinal no domvnio da frequência da pastilha C2.4

A figura 22 mostra os valores ($\Delta f_1 = 650E3$ Hz, $\Delta f_2 = 650E3$ Hz, $\Delta f_3 = 650E3$ Hz, $\Delta f_4 = 651E3$ Hz e $\Delta f_5 = 649E3$ Hz) de todos os Δf do sinal. Os Δf s são os intervalos entre os picos de frequência e a sua metodologia da medida será apresentada no item 3.2.1. Este sinal sendo totalmente discretizado podem ocorrer certos erros nas medidas, como pode ser analisar nos valores encontrados nos Δf da pastilha C2.4, pois em alguns destes Δf (Δf_4 e Δf_5) os resultados não foram idênticos, mas se diferenciam por pouco,

então para amenizar este erro na medida basta realizar uma média aritmética dos valores encontrados de cada pico de frequência.

Acima foi mencionado que o sinal ultra-sônico no domínio do tempo é periódico, assim como, o sinal no domínio da frequência e também tendo uma forma de determinar o Δf analoga a determinação do tempo; por sua vez sabendo que o Δt igual a frequência e a frequência é o inverso do tempo. Esta relação é a base para a utilização da técnica proposta.

Com base nesses argumentos a maneira de determinar a velocidade ultra-sônica no domínio da frequência se torna análogo a determinação pela técnica convencional; a única diferença é na equação que calcula a velocidade ultra-sônica, pois ao invés de usar o tempo aplicar-se-á o inverso dele, que por sua vez é a frequência.

Para poder compreender todas as informações apresentadas até o momento será necessário entender melhor o processo de construção do sinal ultra-sônico no domínio da frequência, tema este apresentado no tópico 3.2.1

3.2.1. Determinação do delta f

Já foi demonstrado que um sinal no domínio do tempo pode ser transformado para o domínio da frequência sem perder suas propriedades. Também já foi mostrado que um sinal periódico no domínio do tempo tem como transformada outro sinal periódico no domínio da frequência.

Agora será mostrado como se determina teoricamente o Δf para que se possa calcular a velocidade ultra-sônica no domínio da frequência.

Um sinal no domínio do tempo $f(t)$ pode ser expresso no domínio da frequência $F(f)$ pela relação abaixo:

$$f(t) \rightarrow F(f) \rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (25)$$

Então, para provar que o modo de determinar o tempo de percurso da onda ultra-sônica no domínio da frequência (técnica proposta) é análogo a determinação do tempo pela técnica convencional, tem-se que mostrar que a relação,

$$f_2 - f_1 = \frac{1}{T_1 - T_2}$$

é verdadeira.

Faz-se necessário realizar a transformada de Fourier

$$F[h(t)] = F[\delta(t - T_1)] - F[\delta(t - T_2)] \quad (26)$$

para provar que a FT de um sinal periódico consiste em impulsos (δ) localizados nas freqüências harmônicas do sinal, sendo que a amplitude de cada impulso corresponde a coeficientes da série exponencial [12].

Sabendo que a FT é dado pela relação (25), para uma função deslocada no tempo tem a forma,

$$f(t - T) \rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} f(t - T) e^{-j2\pi f t} dt \quad (27)$$

Aplicando uma mudança de base, obtêm-se:

$$t - T = u$$

$$t = u + T$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(u) e^{-j2\pi f (u+T)} du = e^{-j2\pi f T} \int_{-\infty}^{\infty} f(u) e^{-j2\pi f u} du$$

Onde

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(u) e^{-j2\pi f u} du$$

é a transformada de Fourier do sinal. Portanto a FT deslocada no tempo apresenta-se,

$$e^{-j2\pi f T} F(f)$$

Com isso a FT $\delta(t - T_1)$ e $\delta(t - T_2)$ fica descrita desta forma,

$$\delta(t - T_1) \xrightarrow{F} e^{-j2\pi f T_1} \cdot 1 \quad \text{e} \quad \delta(t - T_2) \xrightarrow{F} e^{-j2\pi f T_2} \cdot 1$$

Tendo em vista que a transformada de Fourier do impulso no tempo t é igual a 1, onde esta demonstrada na relação abaixo [13]:

$$F[\delta(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)e^{-jft} dt = e^{-jf0} = 1 \quad (28)$$

Então para este problema, basta resolver a equação (26) com os valores acima.

$$F[h(t)] = e^{-j2\pi f T_1} - e^{-j2\pi f T_2}$$

Resolvendo:

$$\begin{aligned} e^{-j2\pi f \frac{T_1}{2}} \left(e^{-j2\pi f \frac{T_1}{2}} - e^{-j2\pi f T_2} \cdot e^{j2\pi f \frac{T_1}{2}} \right) &= \\ = e^{-j2\pi f \frac{T_1}{2}} \cdot e^{-j2\pi f \frac{T_1}{2}} \left(e^{-j2\pi f \frac{T_1}{2}} \cdot e^{j2\pi f \frac{T_1}{2}} - e^{-j2\pi f \frac{T_1}{2}} \cdot e^{j2\pi f \frac{T_1}{2}} \right) &= \\ = e^{-j2\pi f \left(\frac{T_1+T_2}{2}\right)} \left(e^{-j2\pi f \left(\frac{T_1-T_2}{2}\right)} - e^{-j2\pi f \left(\frac{T_2-T_1}{2}\right)} \right) & \quad (29) \end{aligned}$$

Chamando $e^{-j2\pi f \left(\frac{T_1-T_2}{2}\right)}$ de (a) e $e^{-j2\pi f \left(\frac{T_2-T_1}{2}\right)}$ de (-a) e resolvendo o termo que esta dentro do parênteses obtêm-se:

$$e^{-j\alpha} - e^{j\alpha} = \cos \alpha - j \sin \alpha + (-\cos \alpha - j \sin \alpha) = -2j \sin \alpha$$

$$e^{-j2\pi f \left(\frac{T_1+T_2}{2}\right)} \left\{ -2j \sin \left[2\pi f \left(\frac{T_1-T_2}{2}\right) \right] \right\}$$

$$|F[h(t)]| = 2 \left| \sin \left[2\pi f \left(\frac{T_1-T_2}{2}\right) \right] \right| \quad (30)$$

Generalizando para $\frac{\pi}{2}$ e $\frac{3\pi}{2}$ a equação descrita acima fica

$$2\pi f_x \left(\frac{T_1-T_2}{2}\right) = \frac{\pi}{2} \rightarrow f_x = \frac{1}{2(T_1-T_2)}$$

$$2\pi f_2 \left(\frac{T_1 - T_2}{2} \right) = \frac{3\pi}{2} \rightarrow f_2 = \frac{3}{2(T_1 - T_2)}$$

Efetuando a diferença dos valores, tem-se:

$$f_2 - f_1 = \frac{1}{(T_1 - T_2)} \quad (31)$$

Na prática, primeiramente se adquire o sinal ultra-sônico no domínio do tempo após percorrer o material. O sinal utilizado, como exemplo foi o da pastilha C2.5 (figura 24) que será definido do capítulo 4 .

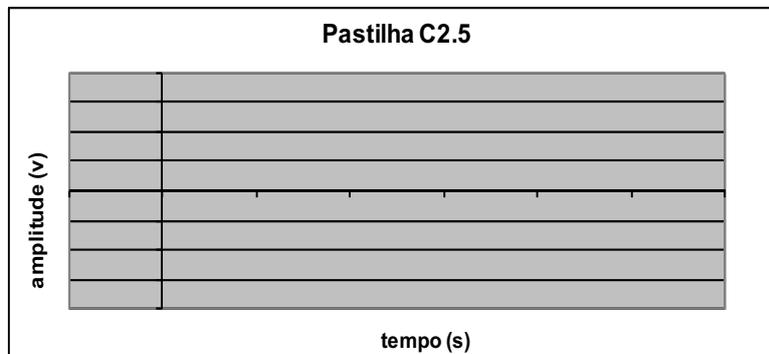


Figura 24: Sinal no domínio do tempo da pastilha C2.5

Após a aquisição do sinal ultra-sônico no domínio do tempo realiza – se a transformada rápida de Fourier do sinal para o domínio da frequência (figura 25), no caso deste experimento, o osciloscópio usado possuía a capacidade de realizar automaticamente a FFT.

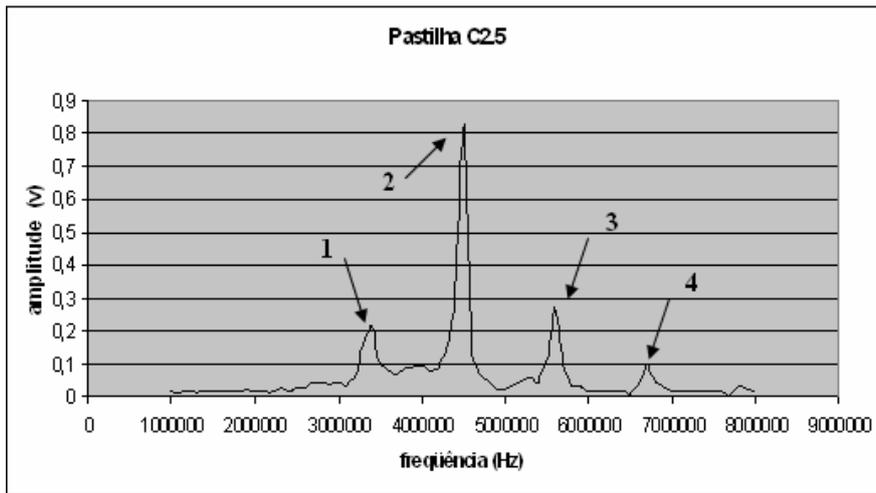


Figura 25: Sinal no domínio da frequência da pastilha C2.5

Com o sinal já transformado cabe agora determinar os intervalos entre os picos de frequência. Será determinado para este exemplo o intervalo entre apenas dois picos, pois o processo é o mesmo e não haverá necessidade de mostrar para todos os intervalos entre os picos deste sinal.

Inicialmente foi escolhido os picos 1 e o 2 do sinal no domínio da frequência (figura 26).

Figura 26 : Pico 1 e 2 da pastilha C2.5 em destaque

Para selecionar os picos 1 e 2 basta encontrar os valores referentes a estes picos na planilha de dados, que corresponde ao sinal do material analisado (figura 27) e destacá-los.

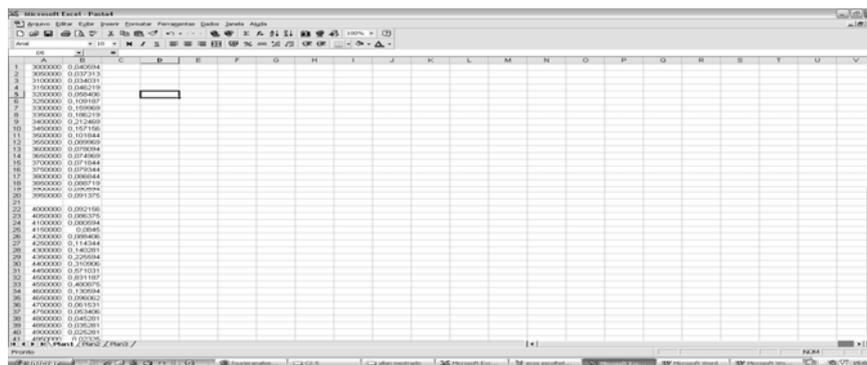
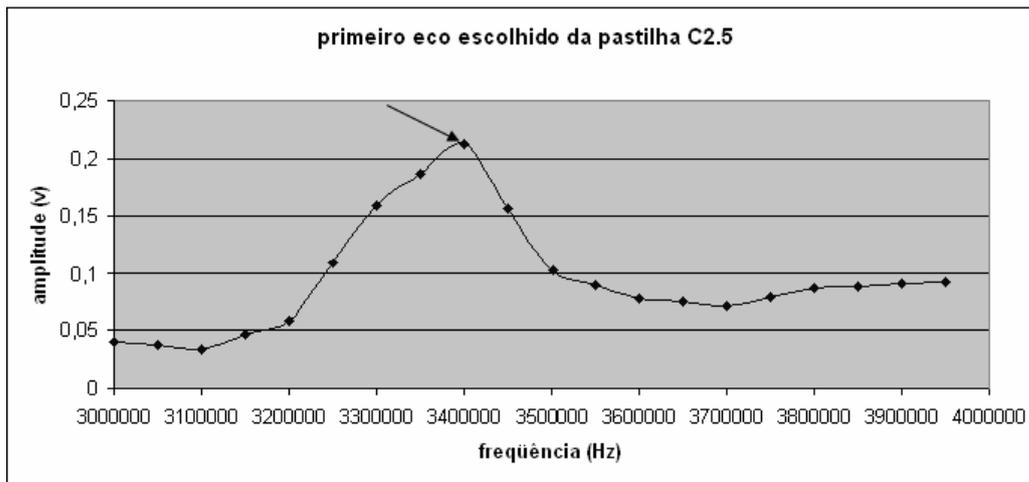
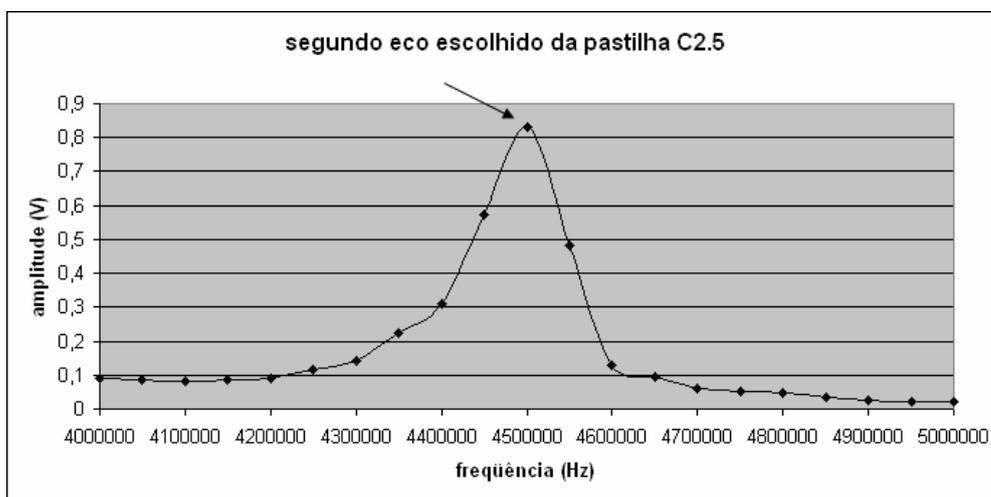


Figura 27: Dados divididos do sinal ultra-sônico destacados

Tendo separado os picos, agora basta localizar os valores máximos de cada um e subtraí-los (figura 28), assim o valor correspondente ao Δf t determinado.



(a)



(b)

Figura 28: Pico 1 do sinal ultra-sônicos da pastilha C2.5 (a); pico 2(b)

4. Materiais e Experimentos

4.1. Generalizações

Nesse trabalho foram realizados cinco experimentos com objetivo de validar essa nova técnica de determinação do tempo de percurso da onda ultra-sônica. Estes experimentos estão resumidamente descritos abaixo. Os detalhes destes experimentos estão apresentados no tópico 4.4

1) **Primeiro experimento** – Determinação da velocidade ultra-sônica nas pastilhas cerâmicas - a base de alumina - com diversas espessuras e porosidades; utilizando o método convencional (intervalo ente dois ecos consecutivos visto no tópico 3.1) quando

possível. As velocidades calculadas pelo tempo de percurso do sinal ultra-sônico vão ser comparadas com os valores calculados com a técnica proposta (tópico 3.2).

Cabe ressaltar que nesta primeira parte do trabalho, ao transformar o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, o pulso inicial será incluído, pois em alguns casos o pulso inicial se encontra sobreposto com as reflexões do sinal ultra-sônico.

2) **Segundo experimento** - Realizar o experimento acima citado, porém excluindo o pulso inicial do sinal no domínio do tempo.

3) **Terceiro experimento** – Determinação e a comparação das velocidades ultra-sônicas nas pastilhas cerâmicas utilizando um transdutor de onda transversal. Com o transdutor de onda transversal é possível determinar todos os tempos de percursos das pastilhas cerâmicas utilizada neste trabalho.

4) **Quarto experimento** - Determinação da espessura das chapas de alumínio utilizando a técnica proposta. Nesse caso não foi possível a determinação das espessuras com o uso da técnica convencional.

5) **Quinto experimento** – Determinação da espessura de uma chapa de alumínio utilizando a técnica proposta pelo método por imersão. Neste experimento a chapa de alumínio esta imersa em água em um tanque. Este experimento é o inicio dos estudos com o método de imersão que é a forma adequada para a inspeção das pastilhas combustível do reator nuclear.

4.2. Materiais

Para a realização dos três primeiros experimentos foram selecionadas 20 pastilhas cerâmicas - a base de alumina (figura 29) - produzida pelo Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), com diferentes temperaturas de sinterização. Estas pastilhas foram separadas em cinco grupos A, B, C, D e E, conforme a temperatura de sinterização. As temperaturas de sinterização selecionadas foram 1150°C, 1400°C, 1480°C, 1540°C e 1580°C que representam respectivamente os grupos A, B, C, D e E.

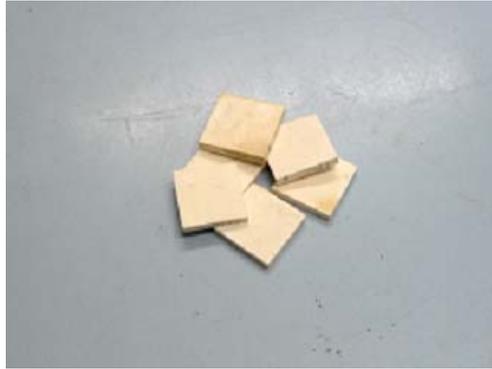


Figura 29: Pastilha cerâmica quadrada, a base de alumina

Como observado, na figura 29, todas as pastilhas utilizadas na pesquisa possuem formas quadradas planas.

Cada grupo de pastilhas foi subdividido - conforme sua tensão de prensagem – a 50MPa e 100MPa. Foram denominadas de A1 as pastilhas sintetizadas a 1150°C e com a prensagem de 50MPa e assim, para as prensagens de 100MPa foi à nomenclatura A2. Desta mesma forma foi definido para os demais grupos (B1 e B2, C1 e C2, D1 e D2, E1 e E2).

Além da temperatura de sinterização e da tensão prensagem, outro fator importante destas pastilhas, é a porosidade que foi medida pela Técnica de Arquimedes.

As pastilhas também foram divididas em subgrupos de acordo com sua própria numeração. Cabe informar que as pastilhas não têm espessura padronizada, todos esses dados assim como a denominação das pastilhas, pode ser conferido na tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Pastilhas cerâmicas quadradas

Pastilha	Temperatura de sinterização	Prensagem em MPa	Espessura (mm)	Percentual de porosidade (%)
A1.3	1150	50	4,282	39,0
A1.5	1150	50	4,269	39,8
A2.3	1150	100	4,138	37,1
A2.5	1150	100	4,168	37,2

B1.3	1400	50	3,952	28,5
B1.4	1400	50	4,008	29,7
B2.3	1400	100	3,972	28,7
B2.5	1400	100	4,012	28,7
C1.1	1480	50	3,686	22,4
C1.2	1480	50	3,792	21,4
C2.4	1480	100	3,815	19,4
C2.5	1480	100	3,685	19,6
D1.3	1540	50	3,658	11,1
D1.5	1540	50	3,511	11,9
D2.3	1540	100	3,634	10,6
D2.5	1540	100	3,584	10,4
E1.3	1580	50	3,428	6,67
E1.5	1580	50	3,406	5,87
E2.3	1580	100	3,523	5,54
E2.5	1580	100	3,516	5,81

No quarto experimento foram utilizados, três chapas de alumínio, que receberam a denominação - de chapa A, chapa B e chapa C – com as respectivas espessuras 0,94mm, 2,47mm e 3,32mm. Já no quinto experimento foi empregada apenas a chapa B. Essas espessuras foram medidas com o micrometro, da marca Mitutoyo, com precisão 0,01 mm.

4.3. Equipamentos e Métodos

Na aquisição dos sinais ultra-sônicos, foram empregados os equipamentos, conforme a figura 30:

- Osciloscópio TDS3032B da marca Tektronix
- Gerador de Pulsos Epoch 4 Plus da Panametrics
- Computador

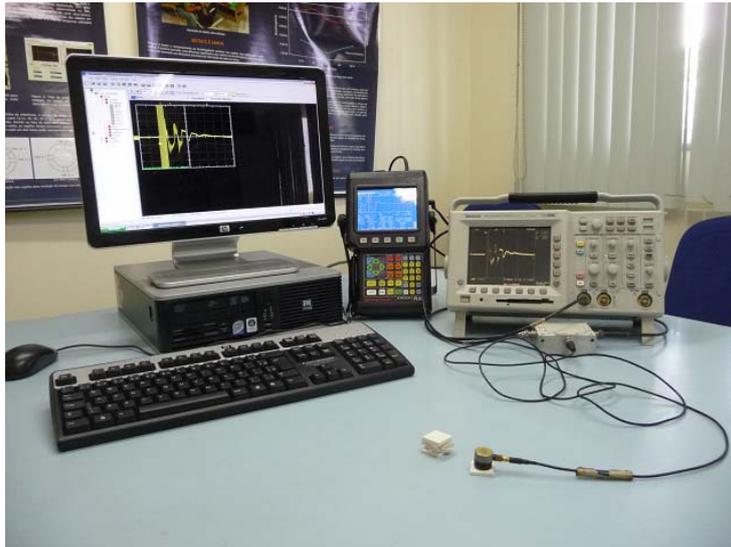


Figura 30: Osciloscópio e gerador de sinais ultra – sônicos

Para aquisição dos sinais - tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência - foi utilizado o software Wavestar (figura 31), que consiste em um programa de captura e armazenamento dos sinais ultra-sônicos. Cabe informar que o Waverstar salva o sinal em uma planilha de dados com dez mil pontos discretizados. No domínio do tempo todos os pontos são usados na construção do sinal, já no domínio da frequência com pontos foram usados para representar o sinal.

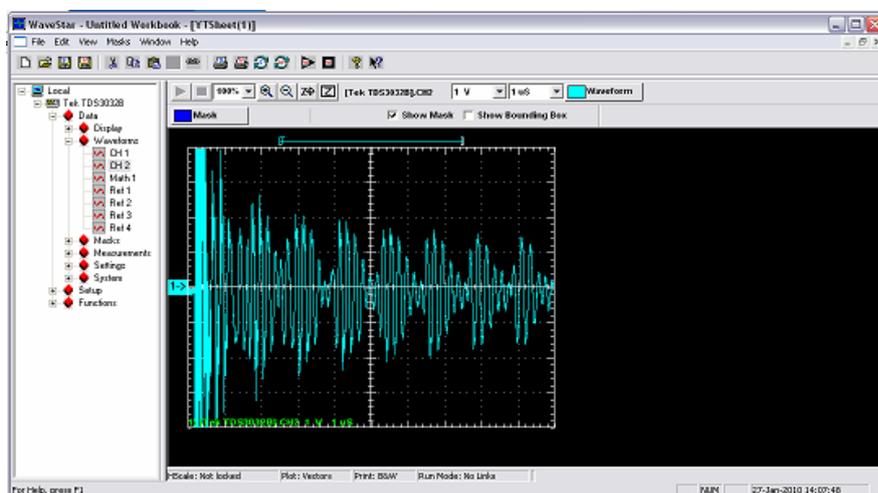


Figura 31: Captura do sinal ultra-sônico com o programa waverstar

A figura 31 mostra a tela do programa waverstar, onde foi realizada a captura de um sinal ultra-sônico.

Após a descrição dos equipamentos citados acima será descrito o processo de aquisições dos sinais ultra-sônicos.

Para realização de cada experimento foram adquiridos 10 (dez) sinais ultra-sônicos no domínio do tempo e 10 (dez) sinais ultra-sônicos no domínio da frequência.

O transdutor utilizado para o primeiro, segundo e quarto experimento foi um transdutor de onda longitudinal de 5 MHz , enquanto o terceiro experimento foi utilizado um transdutor de onda transversal 2,25 MHz e no quinto experimento um transdutor de imersão de 10 MHz. Todos os transdutores são da marca Panametrics e mostrados na figura 32.



Figura 32: Transdutores ultra-sônicos utilizados nos experimentos

A figura 32 mostra os transdutores que foram utilizados nos experimentos da direita para esquerda: transdutor de 2,25MHz de onda transversal, no meio o transdutor de imersão de 10MHz e na esquerda o transdutor longitudinal de 5MHz.

Os acoplantes usados foram:

- Vaselina líquida para os experimentos - no primeiro, segundo e quarto experimentos que utilizaram o transdutor longitudinal.
- Acoplante COUPLANT SWX da Panametrics, no terceiro experimento que usou o transdutor transversal.
- Água no último experimento que utilizou o transdutor de imersão de 10MHz.

A determinação do tempo de percurso do sinal ultra-sônico foi realizada por um programa desenvolvido pelo Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) chamado Chronos (figura 33), que mede o tempo de percurso do sinal ultra-sônico de dois ecos consecutivos utilizando a correlação cruzada.

Para determinar o tempo de percurso do sinal ultra-sônico utilizando o programa Chronos é necessário introduzir os dados referentes a dois ecos consecutivos do material analisado. Para isso utiliza-se o programa Wavestar (mencionado acima) para a captura destes dois ecos e com esses dados o programa pode calcular o tempo de percurso do sinal ultra-sônico no domínio do tempo. Uma dificuldade para a determinação do tempo de percurso utilizando o Chronos é quando os ecos do sinal ultra-sônico estão sobrepostos, isso acarreta que a captura dos dados necessários (dois ecos consecutivos) para o uso do programa se torna impraticável mesmo expandindo ao máximo a escala horizontal do osciloscópio. Não é possível destacar apenas duas reflexões. Outra dificuldade é quando o pulso inicial está sobreposto à primeira reflexão. A figura 33 mostra a tela do programa chronos [21].

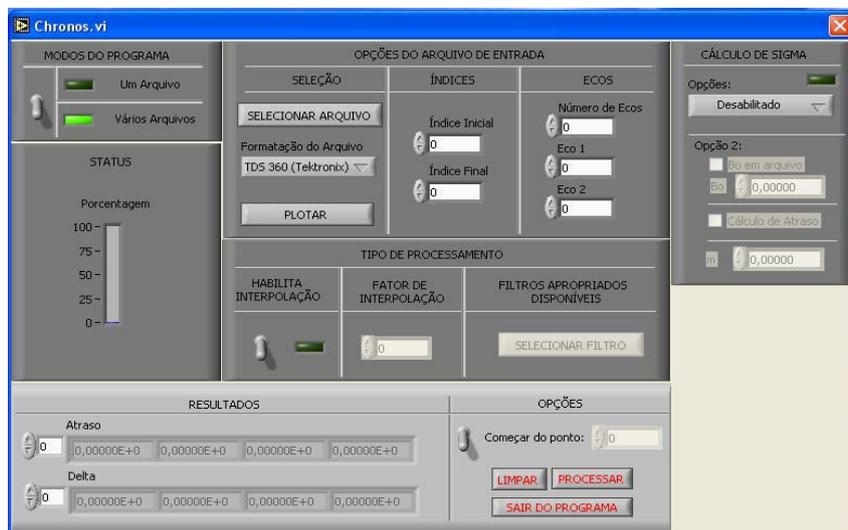


Figura 33: Tela do programa chronos

O método de aquisição de medidas de velocidade ultra-sônica utilizando o domínio da frequência consiste em determinar o Δf (delta de freqüência) a partir do intervalo entre dois picos de frequência adjacentes do sinal da FFT, que estão presentes no pulso ultra-sônico (figura 34) como já foi explicado no tópico 3.2.

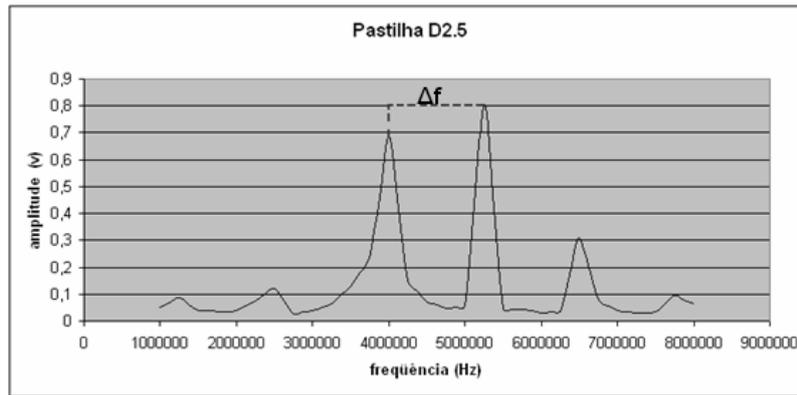


Figura 34: Determinação do delta de frequência

Como já foi visto anteriormente na seção 3.2 que tratava da técnica proposta (sinal ultra-sônico no domínio da frequência), a série de Fourier de um sinal de comprimento N , possui uma amostragem em N pontos uniformes, com espaçamento $2\pi/N$.

Sabendo que a frequência é o inverso do tempo, podemos calcular a velocidade da onda ultra-sônica utilizando o domínio da frequência, realizando o cálculo de maneira análoga ao cálculo da velocidade do pulso ultra-sônico no domínio do tempo, como descrito anteriormente (método convencional) utilizando a equação abaixo.

Equação:

$$V = 2df \quad (31)$$

Onde V é a velocidade, d é a distancia e f é a frequência.

4.4. Procedimentos experimentais

Os experimentos apresentados a seguir têm como finalidade validar a técnica proposta em diferentes casos como: a determinação da velocidade ultra-sônica no domínio da frequência utilizando o sinal completo (pulso inicial + sinal ultra-sônico que percorre o material) e comparando os resultados com o método convencional (experimento 1); a comparação dos valores das velocidades ultra-sônicas com o método convencional com os valores das velocidades com o método proposto, mas antes de realizar a FFT (do sinal) o pulso inicial sendo excluído (experimento 2); a comparação dos valores das velocidades ultra-sônicas com o método convencional com os valores das velocidades com o método proposto utilizando um transdutor de onda transversal (experimento 3); o cálculo da espessura utilizando apenas a técnica proposta com o método de contato (experimento 4); e utilizando o método por imersão para o cálculo da espessura com a técnica proposta (experimento 5).

4.4.1. Primeiro Experimento

Para a realização deste experimento foi utilizado o método de contato com a técnica convencional, ver tópico 3.1, com um transdutor de onda longitudinal de 5 MHz da marca Panametrics .

Os materiais utilizados foram 20 pastilhas cerâmicas - a base de alumina - com diferentes espessuras, porosidades e temperaturas de sinterização (ver seção 4.2).

A aquisição dos sinais ultra-sônicos no domínio da frequência foi feita a partir do sinal inteiro no domínio do tempo (sinal ultra-sônico que percorre o material + pulso inicial) como pode ver na figura 35.

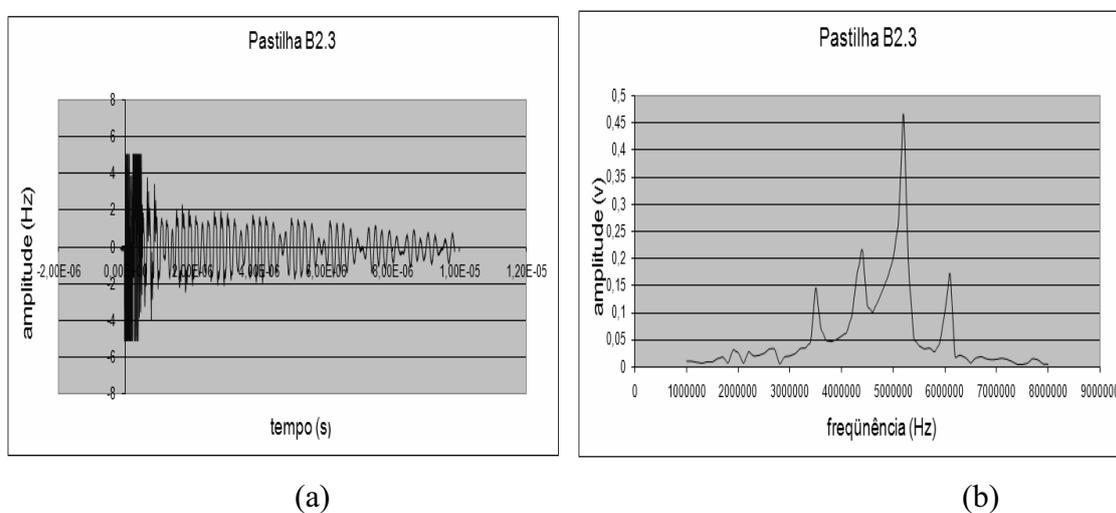


Figura 35: Sinal no domínio do tempo da pastilha B2.3 (a) e sinal no domínio da frequência (b)

A figura 35a mostra o sinal completo da pastilha B2.3 no domínio do tempo, onde pode ser percebido o pulso inicial e o sinal ultra-sônico que percorre o material, já na figura 35b o sinal ultra-sônico no domínio da frequência da mesma pastilha B2.3; cabe lembrar que esse sinal contém a transformação do pulso inicial mais o sinal ultra-sônico que transcorre o material no domínio do tempo.

O motivo para a experimentação do pulso inicial é que em alguns materiais com a porosidade muito pequena ou com a espessura muito fina pode ocorrer uma sobreposição dos ecos de modo que não possa realizar a distinção correta do pulso inicial e com isso impossibilitando a sua exclusão.

Este experimento tem como finalidade a determinação da velocidade ultra-sônica no domínio da frequência utilizando como base o sinal completo no domínio do tempo.

4.4.2. Segundo Experimento

A finalidade deste experimento é determinar a velocidade ultra-sônica no domínio da frequência, tendo como base apenas o sinal ultra-sônico - no domínio do tempo que percorre o material.

Para que isso fosse possível, o pulso inicial foi localizado e excluído (quando possível) antes de realizar a mudança para o domínio da frequência, como mostra as figuras apresentadas a seguir.

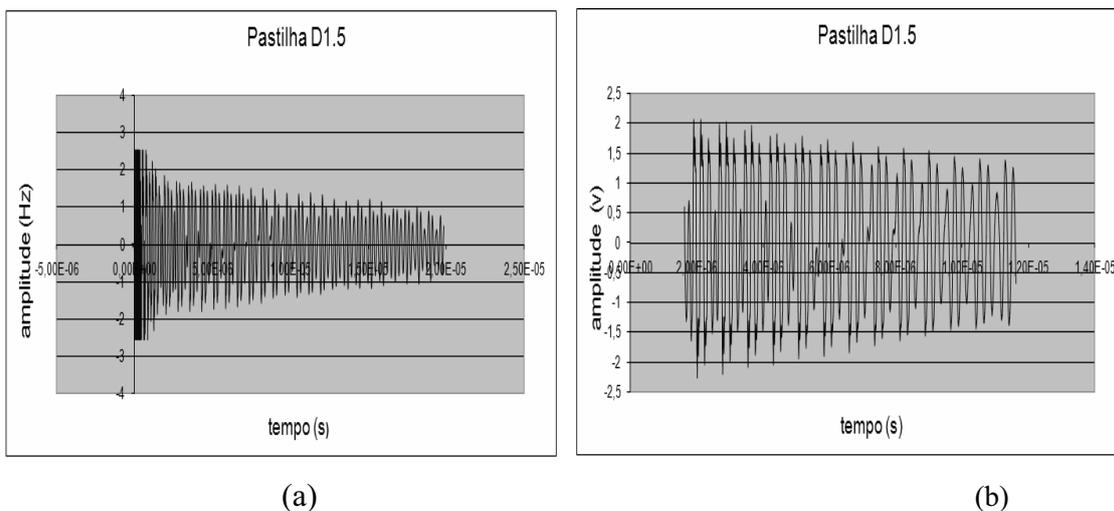


Figura 37: Sinal no domínio do tempo com o pulso inicial da pastilha D1.5 (a) e sem o pulso inicial (b)

A figura 37a mostra o sinal no domínio do tempo da pastilha D1.5 completo - sinal ultra-sônico + pulso inicial - logo foi realizada a exclusão do pulso inicial, figura 37b, e transformando o restante do sinal para o domínio da frequência - como mostra a figura 38b.

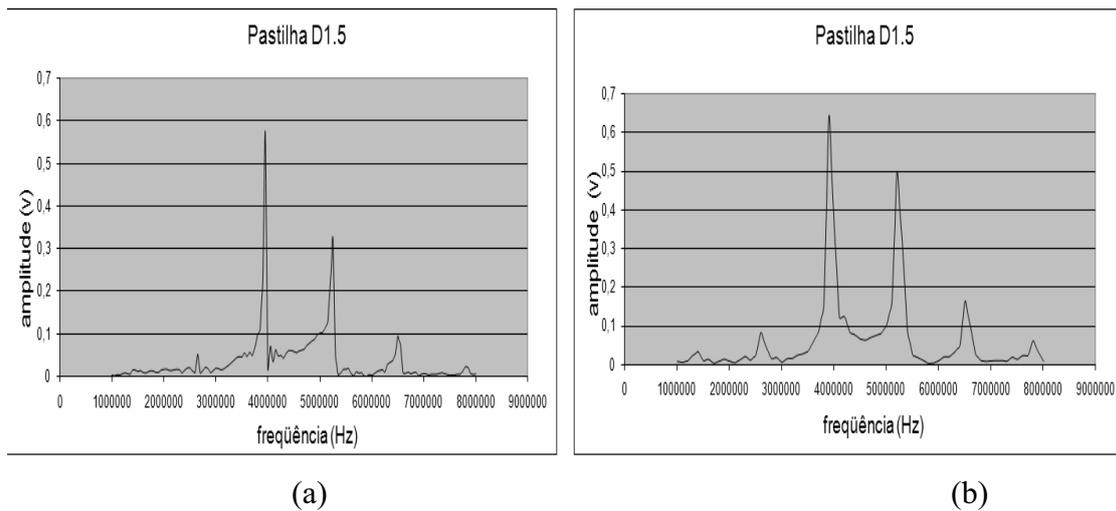


Figura 38: Sinal no domínio da frequência da pastilha D1.5 tomando como base o sinal completo (a) e sinal no domínio da frequência tomando como base o sinal sem o pulso inicial

A figura 38a, mostra o sinal - no domínio da frequência - tendo como base o sinal completo, enquanto na figura 38b tem o sinal - no domínio da frequência - sem o pulso inicial da pastilha D1.5.

4.4.3. Terceiro Experimento

A fim de confirmar melhor a técnica proposta um último experimento utilizando as pastilhas cerâmicas à base de alumina foi realizado. Nesse experimento foi utilizada a técnica por contato (figura 39) com um transdutor ultra-sônico de onda transversal que permitia a determinação do tempo de percurso pela técnica convencional em todas as pastilhas.

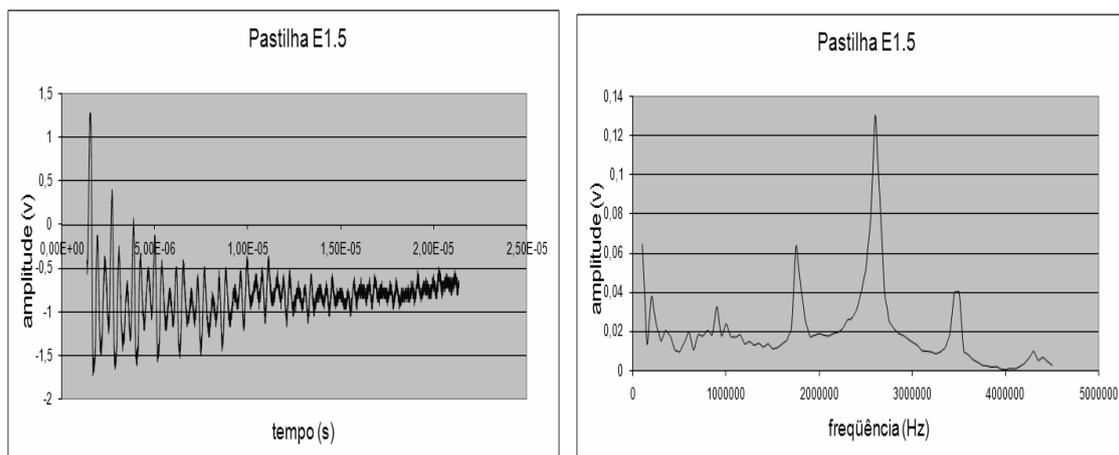
Tendo uma forma de determinar as velocidades ultra-sônicas no domínio do tempo de todas as pastilhas será realizada a comparação destas velocidades com as encontradas utilizando a técnica proposta.



Figura 39: Técnica por contato utilizando o transdutor de onda transversal

O procedimento adotado neste experimento foi o mesmo realizado anteriormente no segundo experimento, foram adquiridos dez sinais no domínio do tempo e dez sinais no domínio da frequência com um transdutor de 2,25 MHz de ondas transversal da marca Panametrics e antes de transformar o sinal ultra-sônico para o domínio da frequência o pulso inicial foi excluído.

As determinações das velocidades ultra-sônicas seguem o mesmo padrão adotado anteriormente. Adquiri-se um sinal ultra-sônico no domínio do tempo, como o da figura 40a, exclui-se o pulso inicial e depois se realiza a transformada rápida de Fourier. Com o sinal transformado para o domínio da frequência (figura 40b) determinam-se os deltas f (distância entre dois ecos consecutivos). O valor médio dos deltas f é aplicado na equação 22 e seu resultado é a velocidade ultra-sônica no domínio da frequência.



(a)

(b)

Figura 40: Sinal ultra-sônico no domínio do tempo da pastilha E1.5 utilizando o transdutor de onda transversal (a) e sinal ultra-sônico no domínio da frequência(b)

Depois de determinada a velocidade ultra-sônica no domínio da frequência, compara-se seu valor com o da técnica convencional.

4.4.4. Quarto Experimento

Todos os experimentos anteriores possuíam uma maneira de comparar os resultados, pois fora possível determinar as velocidades ultra-sônicas nos dois domínios (tempo e frequência). Entretanto, se o material analisado possuir um tempo de percurso do sinal ultra-sônico muito curto a ponto que os ecos fiquem tão sobrepostos que não permita a determinação do seu tempo de percurso, então não haverá como comparar os resultados obtidos pela técnica convencional com a técnica proposta.

Então este experimento tem por finalidade medir a espessura do material quando apenas a técnica proposta é capaz de calcular (espessura), medindo a distancia entre dois picos consecutivos no domínio da frequência para a determinação do Δf .

Para realização deste experimento foram selecionados três chapas de alumínio com diferentes espessuras como descrito na seção 4.2 (figura 41).



Figura 41: Chapa de alumínio

A figura 41 mostra uma das chapas de alumínio que foi utilizada no experimento.

Todas as chapas de alumínio possuem espessuras diferentes como mostra a figura 42. Da esquerda para a direita esta a chapa com 3,32mm, no meio a chapa com 2,47mm e na direita a chapa com 0,94mm.

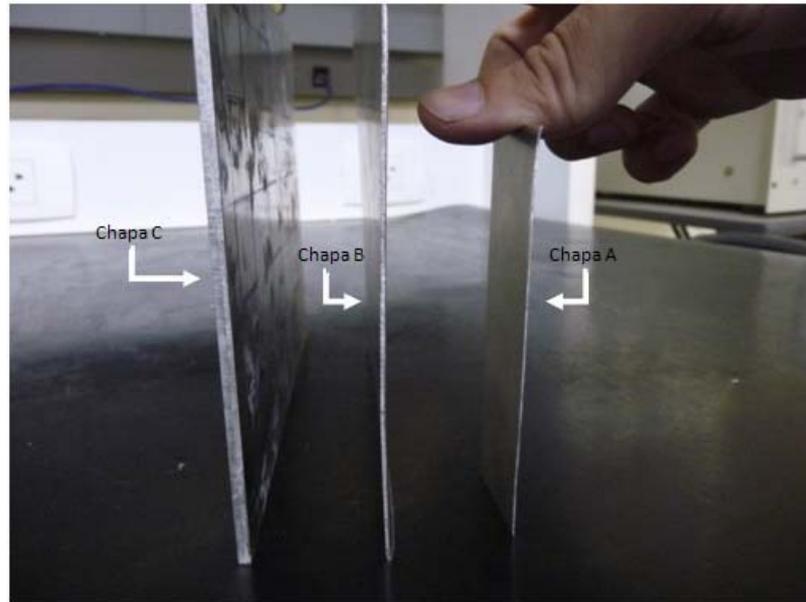
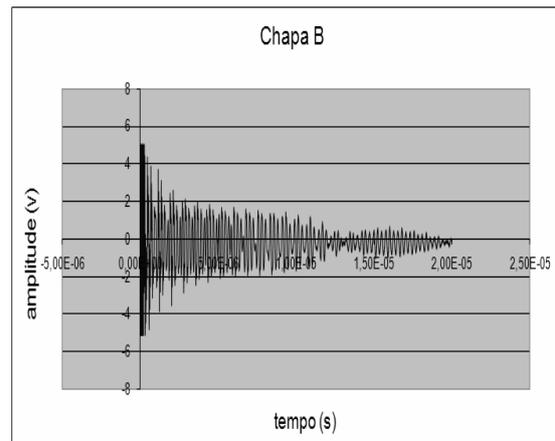


Figura 42: Chapas de alumínio

Como em nenhuma das chapas de alumínio foi possível determinar o tempo de percurso do sinal ultra-sônico (figura 43) utilizando o programa chronos, o uso da técnica convencional não pôde ser aplicada.



(a)



(b)

Figura 43: Chapa alumínio de 2,47mm (a) e o sinal ultra-sônico no domínio do tempo da chapa de alumínio de 2,47mm

Na figura 43 é mostrada uma das chapas de alumínio utilizada no experimento e seu sinal ultra-sônico correspondente ao domínio do tempo, todavia não é possível determinar o tempo de percurso utilizando o programa chronos, em função da sobreposição dos ecos.

Para calcular as espessuras das chapas, foi adotada uma velocidade longitudinal ultra-sônica, tabelada para o alumínio que foi de 6320 m/s [22].

Com a velocidade estipulada, basta obter os valores dos deltas de frequência e calcular a própria espessura com a equação abaixo, e depois confrontar com a espessura encontrada no micrômetro MITUTOYO com precisão de 0,01mm.

$$d = V/2f \quad (32)$$

Cabe informar que o pulso inicial será excluído (quando possível) antes de realizar a transformada rápida de Fourier. Foi utilizado um transdutor longitudinal de 5 MHz da marca Panametrics o mesmo utilizado no primeiro e segundo experimento.

4.4.5. Quinto Experimento

O quinto experimento consiste em determinar a espessura da chapa de alumínio B (no caso a chapa B se encontra imersa) descrita no tópico 4.2 com o uso das duas técnicas (proposta e convencional).

Outro objetivo do sexto experimento é a inicialização no método por imersão do grupo de pesquisa do laboratório de ultra-som do IEN, visando utilizá-lo em materiais onde o método por contato não poderá ser realizado como análise ultra-sônica do nas pastilhas combustíveis do reator nuclear por necessitar de um acoplante que pode contaminar o material.

Neste experimento o método de aquisição do sinal ultra-sônico foi o de imersão. Este método consiste em utilizar um tanque repleto com líquido - no caso deste experimento o líquido utilizado foi água bidestilada.

Com o material imerso foi possível o cálculo da espessura com a técnica convencional, então os resultados das duas técnicas serão comparadas com o valor encontrado pelo micrômetro.

O tanque de imersão utilizado neste experimento foi fabricado pelo Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) e contém as seguintes dimensões: 40 cm de Altura, 60 cm de comprimento e 28,5 cm de largura, apresentado nas figuras 44.



Figura 44: Tanque de imersão

A figura 44 mostra o tanque de imersão com seus componentes: o trilho e o braço mecânico.

O tanque de imersão possui um suporte para um braço mecânico (o trilho) que tem por objetivo utilizar o braço mecânico e utilizá-lo por toda a extensão do tanque como mostra na figura 45.

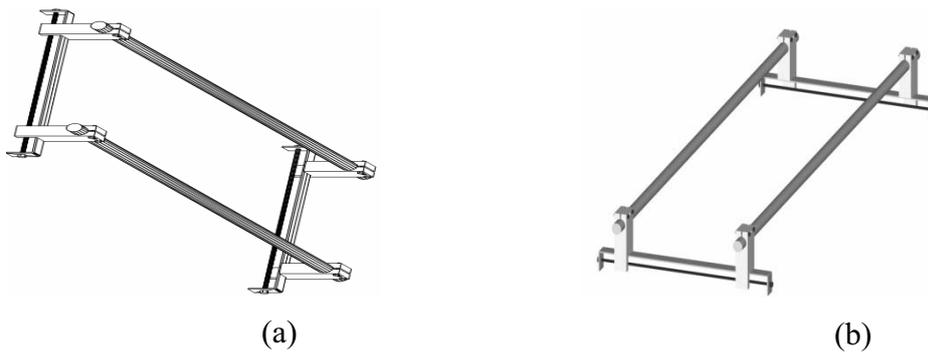


Figura 45: Trilho do tanque de imersão

O braço mecânico (figura 46) tem por finalidade fixar o transdutor, para que seja possível realizar o ensaio ultra-sônico além de conduzi-lo pela extensão do tanque.

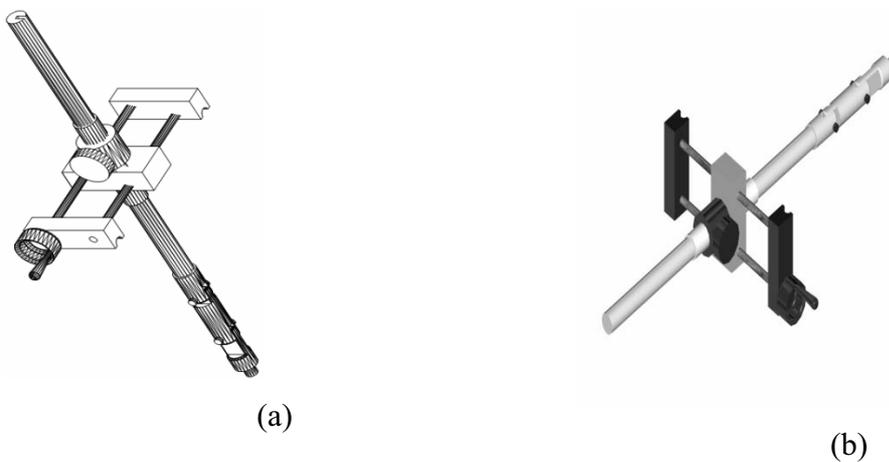


Figura 46: Braço mecânico

A figura 48 mostra que o braço mecânico que pode se movido tanto para direita como para a esquerda (figura 46a) e também para cima e para baixo (figura 46b).

A chapa de alumínio ficou elevada em dois suportes mostrados na figura 47, pois quando a chapa estava encostada no fundo do tanque não era possível distinguir o sinal ultra-sônico que percorre o material (figura 48); em contra partida a chapa com esses suportes o sinal ficam nítido como mostra a figura 49.

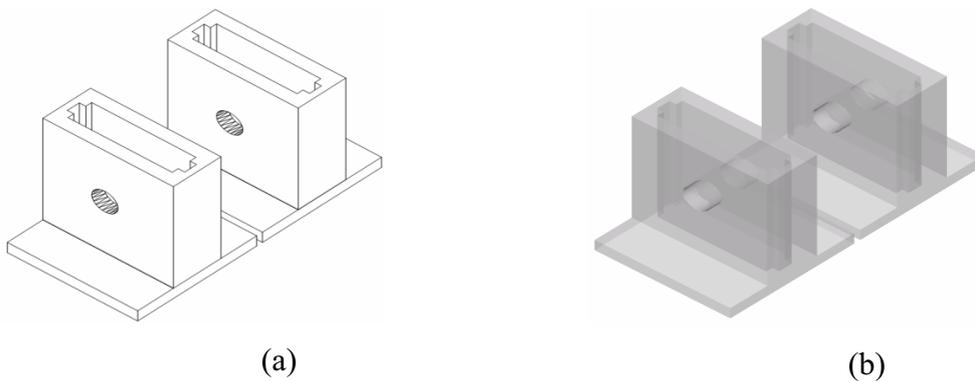


Figura 47: Suporte para as chapa

A figura 47 mostra os suportes que fora utilizado para aumentar a coluna d'água abaixo da chapa de alumínio.

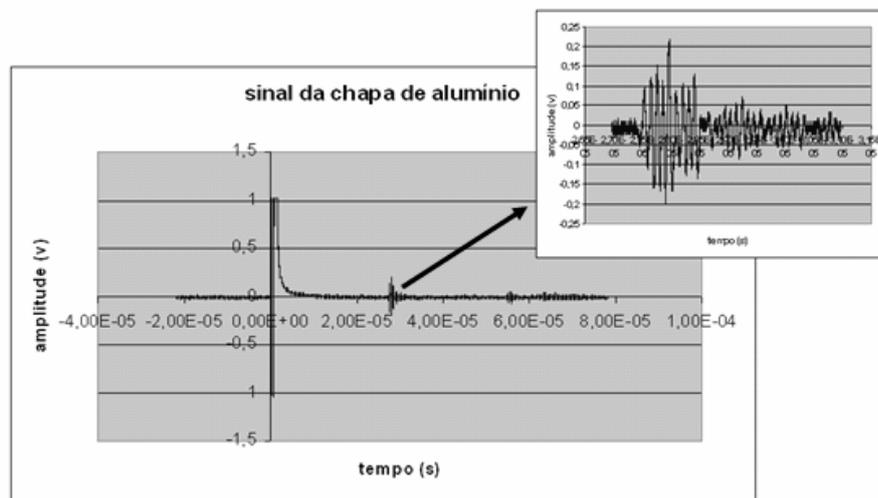


Figura 48: sinal ultra-sônico da chapa de alumínio

Pode ser observado que com o uso dos suportes o sinal ultra-sônico da chapa de alumínio fica nítido.

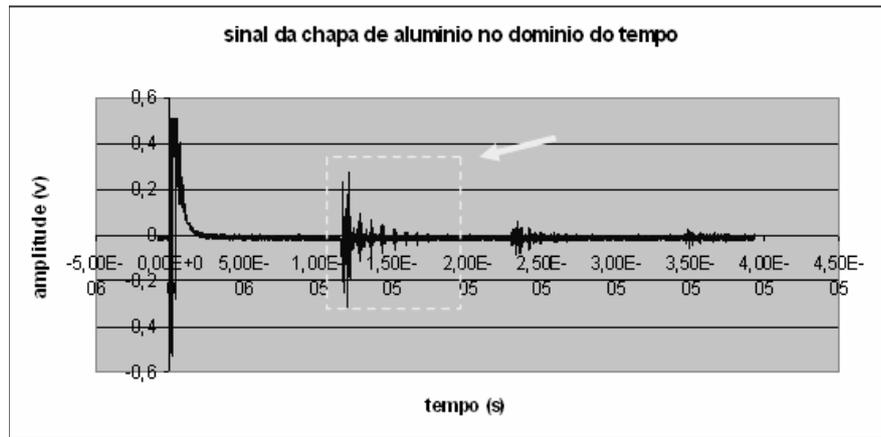


Figura 49: Sinal ultra-sônico da chapa B no domínio do tempo no tanque de imersão

O pacote de dados, utilizado para transformar o sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, está indicado pela seta; o pacote mencionado é referente ao sinal ultra-sônico que percorre a chapa de alumínio.

A figura 50 mostra uma vista expandida do tanque de imersão.

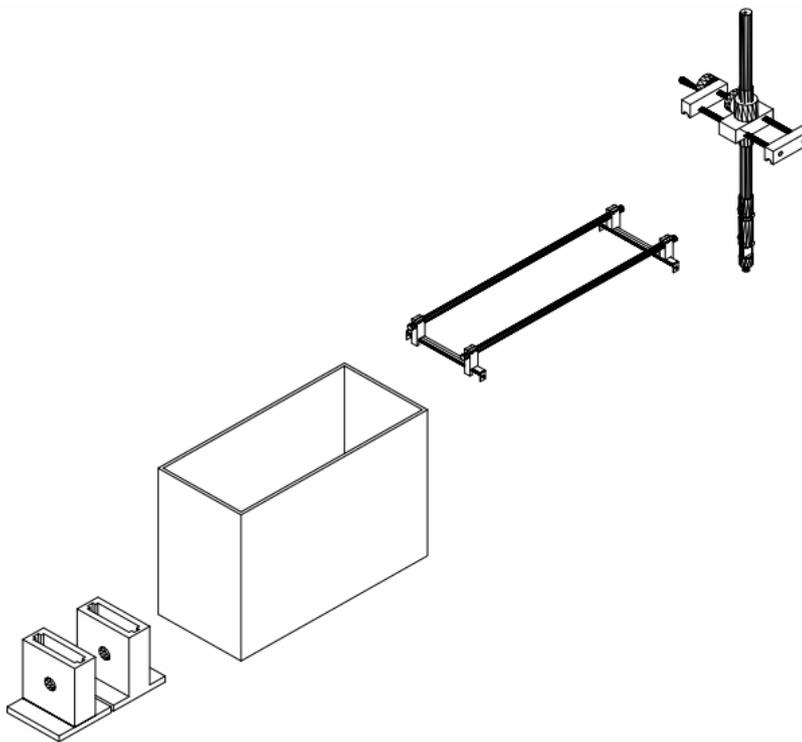


Figura 50: vista expandida do tanque de imersão

5. Resultados e discussão

Após enunciar o método para determinação da velocidade do sinal ultra-sônico pela frequência e descrever todos os experimentos realizados para avaliação da técnica; o próximo passo será a apresentação dos resultados obtidos nos experimentos e a discussão sobre eles. Desta forma será possível garantir a confiança necessária para a utilização da técnica proposta. Todos os sinais utilizados nos experimentos são mostrados nos anexos assim como foi realizado o cálculo da incerteza.

5.1. Primeiro experimento

Neste primeiro experimento foram confrontadas as duas técnicas apresentadas neste trabalho (técnica convencional e técnica proposta) com a utilização de um transdutor de ondas longitudinais de 5MHz. Na técnica convencional (domínio do tempo) foram medidos os tempos de percurso da onda ultra-sônica nas pastilhas cerâmicas a base de alumina com a ajuda do software Chronos (ver tópico 4.3), e com isso foi calculando a velocidade com que a onda percorre o material. Na técnica proposta foram determinados os intervalos entre os picos de frequência (Δf). A partir destes intervalos de frequência foram calculadas as velocidades ultra-sônicas nos materiais. Cabe lembrar que foi utilizado todo o sinal no domínio do tempo (pulso inicial + onda ultra-sônica que percorre o material) para construir o sinal no domínio da frequência.

As velocidades ultra-sônica utilizando método convencional estão apresentados nas tabelas 3, 4, 5, 6 e 7 abaixo e divididos por grupos.

Tabela 3: Valores no domínio do tempo referentes ao grupo A

Pastilha (grupo A)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Tempo (s)	Velocidade (m/s)
A1.3	4,282	39,0	2,34E-6	3659,82±9
A1.5	4,269	39,8	**	**
A2.3	4,138	37,1	2,54E-6	3258,26±8
A2.5	4,168	37,2	1,77 E-6	4706,60±10

Tabela 4: Valores no domínio do tempo referentes ao grupo B

Pastilha (grupo B)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Tempo (s)	Velocidade (m/s)
B1.3	3,952	28,5	1,18E-6	6698,30±24
B1.4	4,008	29,7	1,20E-6	6680,00±26
B2.3	3,972	28,7	1,15E-6	6907,82±25
B2.5	4,012	28,7	1,19E-6	6742,85±26

Tabela 5: Valores no domínio do tempo referentes ao grupo C

Pastilha (grupo C)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Tempo (s)	Velocidade (m/s)
C1.1	3,686	22,4	9,68E-7	7615,70±31
C1.2	3,792	21,4	9,48E-7	8000,00±29
C2.4	3,815	19,4	9,34E-7	8169,16±27
C2.5	3,685	19,6	8,96E-7	8225,44±22

Tabela 6: Valores no domínio do tempo referentes ao grupo D

Pastilha (grupo D)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Tempo (s)	Velocidade (m/s)
D1.3	3,658	11,1	7,84E-7	9331,63±26
D1.5	3,511	11,9	7,68 E-7	9143,22±25
D2.3	3,634	10,6	7,60 E-7	9563,15±28
D2.5	3,584	10,4	7,76 E-7	9237,11±44

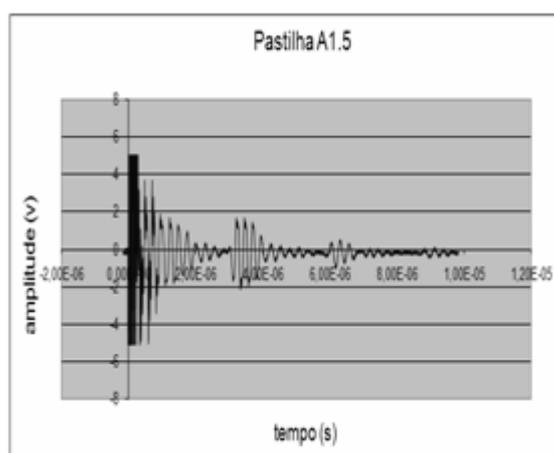
Tabela 7: Valores no domínio do tempo referentes ao grupo E

Pastilha (grupo E)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Tempo (s)	Velocidade (m/s)
E1.3	3,428	6,67	6,88 E-7	9965,11±52
E1.5	3,406	5,87	6,88 E-7	9901,16±36
E2.3	3,523	5,54	**	**
E2.5	3,516	5,81	**	**

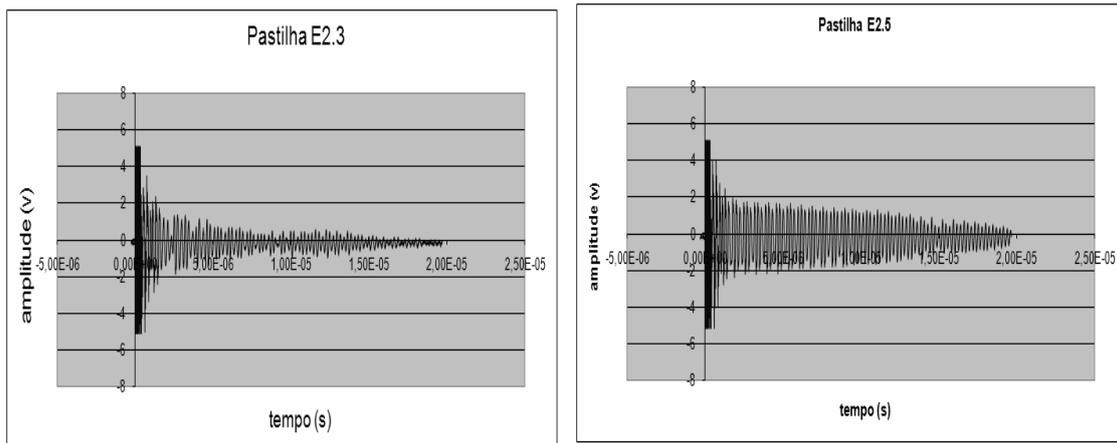
Algumas pastilhas não puderam determinar os tempos de percurso utilizando o programa Chronos pelo motivo que o sinal ultra-sônico no domínio do tempo possuía os ecos sobrepostos, o que dificultava a captura de apenas duas reflexões. Essas pastilhas foram referidas nas tabelas por dois asteriscos (**) para indicar que não possuem valor determinado. Os sinais destas pastilhas são apresentados na figura 51.

Como podem ser observados os sinais 51b e 51c, os ecos se encontram sobrepostos. Um dos motivos para essa sobreposição de ecos é que as velocidades ultra-sônicas apresentadas nestes sinais são altas devido a sua porosidade baixa. As porosidades apresentadas nas pastilhas E2.3 e E2.5 são 5,54% e 5,81% respectivamente.

No caso do sinal da pastilha A1.5 (51a), mesmo possuindo ecos bem espaçados, o Chronos não obteve êxito em determinar o tempo de percurso da onda ultra-sônica, problema esse ainda não esclarecido.



(a)



(b)

(c)

Figura 51: Sinal das pastilhas A1.5 (a), E2.3 (b) e E2.5, que receberam **

Após a determinação das velocidades ultra-sônicas no domínio do tempo foi plotado um gráfico velocidade X porosidade - figura 52; também fora realizado um ajuste linear da curva pelo método dos mínimos múltiplos quadrados. Assim foi possível estimar os valores das velocidades ultra-sônicas - no domínio do tempo - das pastilhas em que a técnica convencional utilizando o software chronos não permitiu sua medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica.

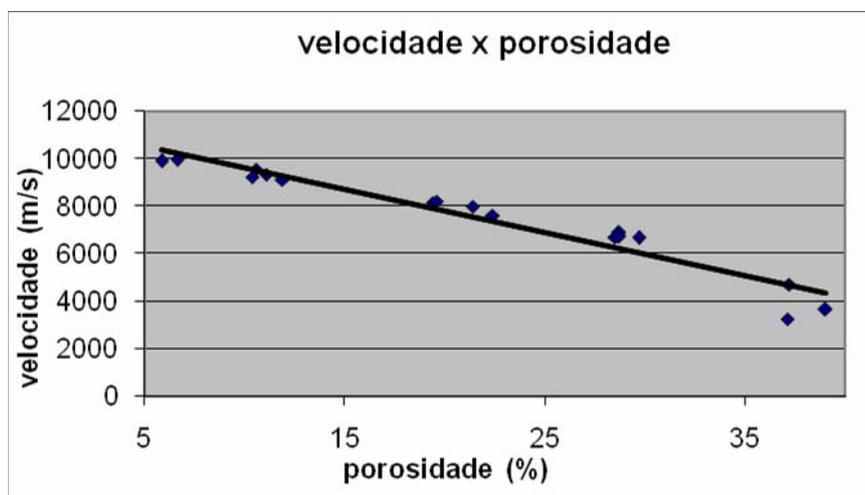


Figura 52: Velocidade X porosidade com ajuste linear

Visivelmente o gráfico da figura 52 tem um padrão linear e com isso podemos determinar a equação da reta, que tem a forma $Y = ax + b$.

A equação da reta encontrada no gráfico acima é:

$$y = -182,67x + 11475 \quad (33)$$

O R^2 que representa a relação entre a reta dos mínimos quadrados e os dados conhecidos. O R^2 varia entre 0 e 1; é dito que os dados seguem um modelo fortemente linear se o $R^2 \geq 0,8$ [23].

Para a determinação do R^2 utiliza-se a equação abaixo:

$$R^2 = \frac{(\sum x_i y_i - \frac{1}{n} \sum x_i \sum y_i)^2}{(\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2)(\sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2)} \quad (34)$$

O resultado encontrado para o R^2 foi de 0,9314, neste caso, o ajuste linear é considerado bom aos dados do problema. Caso contrário é dito que a relação entre os dados não é bem explicada por um modelo linear.

Utilizando a equação 33 é possível estimar os valores de velocidade ultra-sônica no domínio do tempo para as pastilhas que não puderam ter seu tempo determinado pela técnica convencional. Os valores estimados são apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Valores estimados da velocidade ultra-sônica no domínio do tempo

Pastilhas cerâmicas	Velocidade (m/s)
A1.5	4204,73
E2.3	10463,00
E2.5	10413,68

Os valores estimados e apresentados na tabela 8 para as pastilhas E2.3 E2.5 possuem valores da mesma ordem das velocidades medidas pelo método convencional (tabela 7), como ilustra a tabela 9.

Tabela 9: Valores das velocidades ultra-sônicas do grupo E

Pastilhas do grupo E	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Velocidade no domínio do tempo (m/s)
E1.3	3,428	6,67	9965,11
E1.5	3,406	5,87	9901,16
E2.3	3,523	5,54	10463,00
E2.5	3,516	3,516	10413,68

No caso da pastilha A1.5 foi possível determinar o tempo de percurso do sinal ultra-sônico manualmente utilizando os cursores do osciloscópio. Então posicionando um cursor no pico máximo de um dos ecos e o outro (cursor) no eco subsequente (como mostra a figura 53) foi possível determinar o valor de seu tempo de percurso que foi de $2,10 \text{ E-6 s}$. Cabe ressaltar que este valor não possui a mesma precisão fornecida com o uso do chronos.

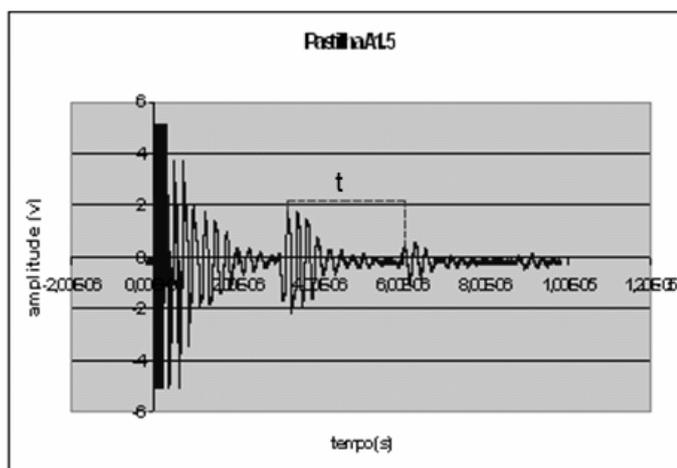


Figura 53: Medida manual usando os cursores do osciloscópio

Os valores das velocidades ultra-sônicas no domínio da frequência utilizando a técnica proposta estão apresentados a seguir nas tabelas 10, 11, 12, 13 e 14.

Tabela 10: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo A

Pastilha (grupo A)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
A1.3	4,282	39,0	413 E3	3536,93±22
A1.5	4,269	39,8	435 E3	3714,03±19
A2.3	4,138	37,1	370 E3	3062,12±18
A2.5	4,168	37,2	550 E3	4584,80±20

Tabela 11: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo B

Pastilha (grupo B)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
B1.3	3,952	28,5	870 E3	6876,48±26
B1.4	4,008	29,7	855 E3	6853,68±26
B2.3	3,972	28,7	850 E3	6752,40±23
B2.5	4,012	28,7	805 E3	8459,32±25

Tabela 12: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo C

Pastilha (grupo C)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
C1.1	3,686	22,4	1,02 E6	7519,44±19
C1.2	3,792	21,4	1,07 E6	8114,88±25
C2.4	3,815	19,4	1,09 E6	8316,70±26
C2.5	3,685	19,6	1,15 E6	8475,5±26

Tabela 13: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo D

Pastilha (grupo D)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
D1.3	3,658	11,1	1,24 E6	9071,84±30
D1.5	3,511	11,9	1,29 E6	9058,38±30
D2.3	3,634	10,6	1,30 E6	9448,40±28
D2.5	3,584	10,4	1,31 E6	9390,00±29

Tabela 14: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo E

Pastilha (grupo E)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
E1.3	3,428	6,67	1,40 E6	9598,40±32
E1.5	3,406	5,87	1,40 E6	9536,80±33
E2.3	3,523	5,54	1,45 E6	10216,70±32
E2.5	3,516	5,81	1,46 E6	10266,72±32

Os valores das duas técnicas apresentadas acima foram exemplificados pelo gráfico - figura 54 - que compara os dois resultados.

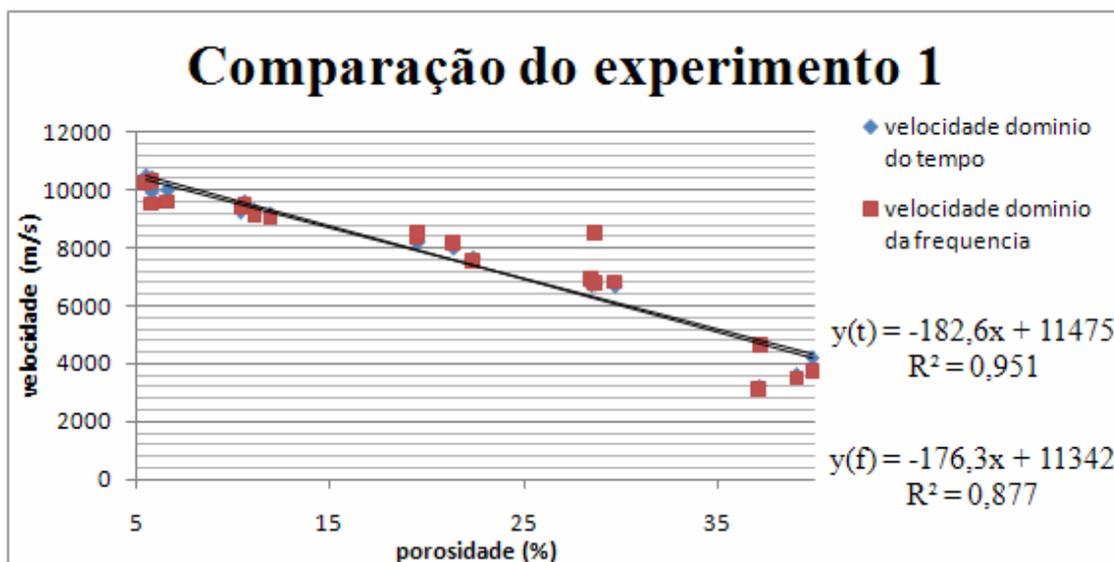


Figura 54: Comparação das duas técnicas (experimento 1)

Foram determinadas as diferenças da técnica proposta, tendo como base os valores das velocidades calculadas pela técnica convencional.

A variação relativa entre as velocidades foi calculada pela equação 34, onde E% é a variação encontrada, V é a velocidade no domínio do tempo, v é a velocidade no domínio da frequência.

$$E\% = \frac{|V - v|}{V} \quad (34)$$

Os valores das diferenças estão apresentados abaixo nas tabelas 15, 16, 17, 18 e 19 e separados pelos seus respectivos grupos.

Tabela 15: Diferenças referentes ao grupo A

Pastilhas do grupo	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
A			
A1.3	3659,82	3536,93	3,35
A1.5	4204,73	3714,03	11,67
A2.3	3258,26	3062,12	6,01
A2.5	4706,60	4584,8	2,58

Tabela 16: Diferenças referentes ao grupo B

Pastilhas do grupo	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
B			
B1.3	6698,30	6876,48	2,66
B1.4	6680,00	6853,68	2,60
B2.3	6907,82	6752,40	2,24
B2.5	6742,85	6619,80	1,82

Tabela 17: Diferenças referentes ao grupo C

Pastilhas do grupo	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
C			
C1.1	7615,70	7519,44	1,26
C1.2	8000,00	8114,88	1,43
C2.4	8169,16	8316,70	1,80
C2.5	8225,44	8475,5	3,04

Tabela 18: Diferenças referentes ao grupo D

Pastilhas do grupo	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
D			
D1.3	9331,63	9071,84	2,78
D1.5	9143,22	9058,38	0,92
D2.3	9563,15	9448,4	1,19
D2.5	9237,11	9390,0	1,65

Tabela 19: Diferenças referentes ao grupo E

Pastilhas do grupo E	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
E1.3	9965,11	9598,40	3,67
E1.5	9901,16	9536,80	3,67
E2.3	10463,00	10216,70	2,35
E2.5	10413,68	10266,72	1,41

Verifica-se que a diferença máxima encontrada com as duas técnicas foi de 11,67% enquanto a menor diferença foi de 0,73%. Neste experimento o pulso inicial estava contido no sinal no domínio do tempo utilizado para transformá-lo para o domínio da frequência.

Os valores das diferenças mostrados neste experimento revelam que a técnica proposta - mesmo utilizando na construção do sinal no domínio da frequência o pulso inicial (domínio do tempo) - é capaz de caracterizar as pastilhas cerâmicas a base de alumina correlacionando a velocidade ultra-sônica com a sua porosidade. Mesmo que em alguns casos a diferença encontrada seja elevada (casos das pastilhas A1.5, A2.3, E1.3 e E1.5) os valores das velocidades contém o mesmo padrão encontrados com a técnica proposta como pode ser observado na figura 54.

Os experimentos mostram também que em alguns casos a diferença entre os valores das duas técnicas não são tão grandes como nos casos das pastilhas B2.5, C1.1, C1.2, C2.4, D1.5, D2.3, D2.5 que possuem diferenças menores que 2%.

Comparando o valor da velocidade ultra-sônica utilizando a técnica proposta, com o valor encontrado medindo o tempo de percurso com o cursor do osciloscópio da pastilha A1.5 foi observado que a diferença presente neste caso é de 13% e quase 500 m/s de diferença, o que significa que a diferença ficou muito alta.

Tabela 20: Comparação das velocidades com o cursor e com a técnica proposta

Pastilhas A1.5	Velocidade medida pelo cursor	Velocidade (técnica convencional)	Diferença (%)
	4065,71	3536,93	13,00

5.2. Segundo experimento

O segundo experimento - como já foi mencionado - será o mesmo do primeiro experimento, agora, contudo, somente será utilizado o sinal ultra-sônico que percorre o material - o pulso inicial será excluído.

Cabe ressaltar que os valores - das velocidades no domínio do tempo - são os mesmos, inclusive os valores estimados - com o ajuste linear; com isso apenas os valores no domínio da frequência serão apresentado nesta etapa e são apresentados nas tabelas 21, 22, 23, 24 e 25 abaixo.

Tabela 21: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo A

Pastilha (grupo	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência	Velocidade
A)			(Hz)	(m/s)
A1.3	4,282	39,0	420 E3	3596,88±22
A1.5	4,269	39,8	490 E3	4183,62±19
A2.3	4,138	37,1	390 E3	3227,64±18
A2.5	4,168	37,2	575 E3	4793,20±20

Tabela 22: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo B

Pastilha (grupo	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência	Velocidade
B)			(Hz)	(m/s)
B1.3	3,952	28,5	850 E3	6718,40±26
B1.4	4,008	29,7	825 E3	6613,20±26
B2.3	3,972	28,7	875 E3	6951,00±23
B2.5	4,012	28,7	835 E3	6700,04±25

Tabela 23: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo C

Pastilha (grupo	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência	Velocidade
C)			(Hz)	(m/s)
C1.1	3,686	22,4	1,03 E6	7593,15±19
C1.2	3,792	21,4	1,06 E6	8039,04±25
C2.4	3,815	19,4	1,07 E6	8164,10±26
C2.5	3,685	19,6	1,10 E6	8107,00±26

Tabela 24: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo D

Pastilha (grupo	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência	Velocidade
D)			(Hz)	(m/s)
D1.3	3,658	11,1	1,28 E6	9364,48±30
D1.5	3,511	11,9	1,31 E6	9198,82±30
D2.3	3,634	10,6	1,32 E6	9593,76±28
D2.5	3,584	10,4	1,30 E6	9318,4±29

Tabela 25: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo E

Pastilha (grupo E)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
E1.3	3,428	6,67	1,45 E6	9941,20±32
E1.5	3,406	5,87	1,45 E6	9877,40±33
E2.3	3,523	5,54	**	**
E2.5	3,516	5,81	**	**

Neste experimento tiveram duas pastilhas que não foram possíveis excluir apenas o pulso inicial com exatidão, então os mesmos valores encontrados no experimento 1 foram mantidos como mostra a tabela 26.

Tabela 26: valores das pastilhas E2.3 e E2.5 encontrados no experimento 1

Pastilha	Frequência
E2.3	1,45 E6
E2.5	1,46 E7

Na etapa seguinte, o pulso inicial foi excluído transformando assim apenas o sinal ultra-sônico no domínio do tempo que percorreu as pastilhas E2.3 e E2.5, os valores de velocidades ultra-sônica no domínio da frequência estão na tabela 27.

Tabela 27: Velocidades ultra-sônica no domínio da frequência das pastilhas E2.3 e E2.5

Pastilha	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
E2.3	3,523	5,54	1,46 E6	10287,16
E2.5	3,516	5,81	1,47 E7	10337,04

Os valores das velocidades - ultra-sônicas tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência - foram comparados assim como no primeiro experimento com um gráfico que confronta os resultados das duas técnicas (figura 55).

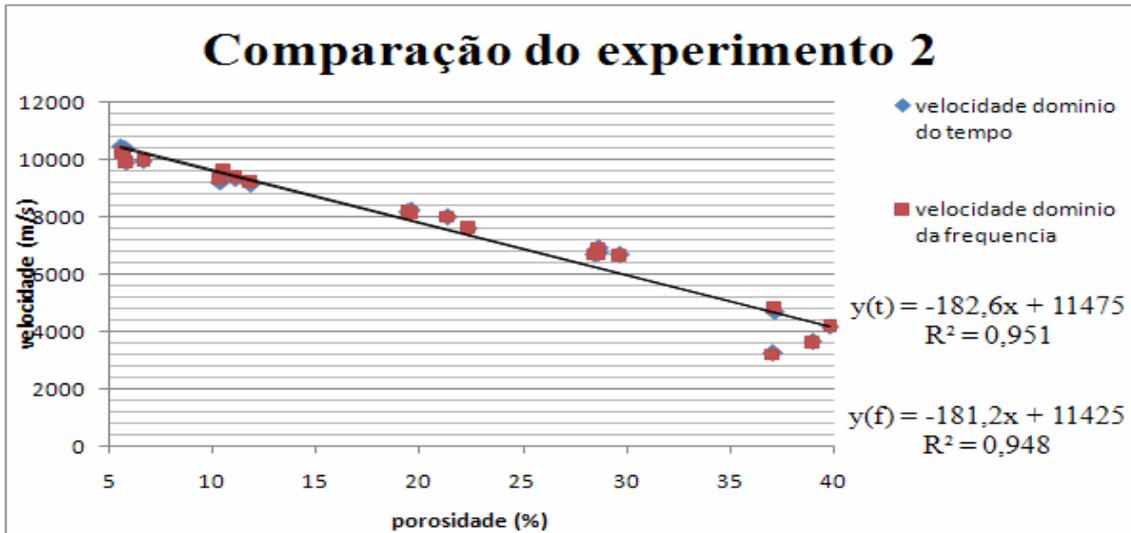


Figura 55: Comparação das duas técnicas (experimento 2)

A técnica proposta - tendo como base apenas o sinal ultra-sônico que percorre o material – novamente se mostrou capaz de caracterizar as pastilhas cerâmicas a base de alumina correlacionando a velocidade ultra-sônica com a sua porosidade como observado na figura 55. A técnica proposta apresenta o mesmo padrão linear encontrado com a utilização da técnica convencional.

As diferenças entre as duas técnicas também foram obtidas, os valores estão apresentados nas tabelas 28, 29, 30, 31 e 32 - separados pelos seus respectivos grupos.

Tabela 28: Diferenças referentes ao grupo A

Pastilhas do grupo	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
A			
A1.3	3659,82	3596,88	1,71
A1.5	4204,73	4183,62	0,5
A2.3	3258,26	3227,64	0,93
A2.5	4706,60	4793,20	1,83

Tabela 29: Diferenças referentes ao grupo B

Pastilhas do grupo B	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
B1.3	6698,30	6718,40	0,30

B1.4	6680,00	6613,20	1,00
B2.3	6907,82	6951,00	0,62
B2.5	6742,85	6700,04	0,63

Tabela 30: Diferenças referentes ao grupo C

Pastilhas do grupo C	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
C1.1	7615,70	7593,15	0,29
C1.2	8000,00	8039,04	0,48
C2.4	8169,16	8164,10	0,06
C2.5	8225,44	8107,00	1,43

Tabela 31: Diferenças referentes ao grupo D

Pastilhas do grupo D	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
D1.3	9331,63	9364,48	0,35
D1.5	9143,22	9198,82	0,60
D2.3	9563,15	9593,76	0,32
D2.5	9237,11	9318,4	0,88

Tabela 32: Diferenças referentes ao grupo E

Pastilhas do grupo E	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
E1.3	9965,11	9941,20	0,23
E1.5	9901,16	9877,40	0,23
E2.3	10463,00	10216,70	2,35
E2.5	10413,68	10266,72	1,41

Comparando o valor da técnica proposta com o valor encontrado utilizando o cursor do osciloscópio. As medidas foram obtidas na pastilha A1.5 e são apresentadas na tabela 33:

Tabela 33: Comparação da velocidade ultra-sônica com o cursor e a técnica proposta

Pastilhas A1.5	Velocidade medida pelo cursor com técnica convencional	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
	4065,71	4183,62	2,90

A técnica proposta - tendo como base o sinal ultra-sônico no domínio do tempo - apenas com o sinal que passa no material, possui diferença máxima encontrada de 2,35%, enquanto a menor diferença foi de 0,06%. Cabe ressaltar que a maior diferença apresentada neste experimento corresponde a um valor de velocidade ultra-sônica onde a base do sinal no domínio do tempo continha o pulso inicial em sua constituição. Outro dado importante sobre as diferenças encontradas no experimento dois foi que das 18 velocidades encontradas (duas não foram determinadas com esse experimento) - 14 possuem diferenças menores de 1%.

Pode ser observado também que os grupos B, C, D e E tiveram diferenças bem menores em comparação com o grupo A. isso ocorreu porque o numero de informação no domínio do tempo (n^0 de ecos) é alto, e como foi descrito no tópico 3.2, o aumento dos ecos provoca uma maior definição no domínio da frequência e com isso uma maior precisão nas medidas foi apresentada.

Excluindo o pulso inicial das pastilhas E2.3 e E2.5 mesmo sem exatidão e confrontando os valores com as velocidades destas pastilhas estimados (ver tópico 5.1), foram determinados seus respectivas diferenças que estão apresentados na tabela 34.

Tabela 34: Velocidades ultra-sônicas das pastilhas E2.3 e E2.5 sem o pulso inicial

Pastilha	Velocidades estimadas (m/s)	Velocidades com técnica proposta (m/s)	Diferença (%)
E2.3	10463,00	10287,16	1,68
E2.5	10413,68	10337,04	0,73

A tabela 34 mostra que com a exclusão do pulso inicial as diferenças correspondentes as pastilhas E2.3 e E2.5 tem uma redução considerável.

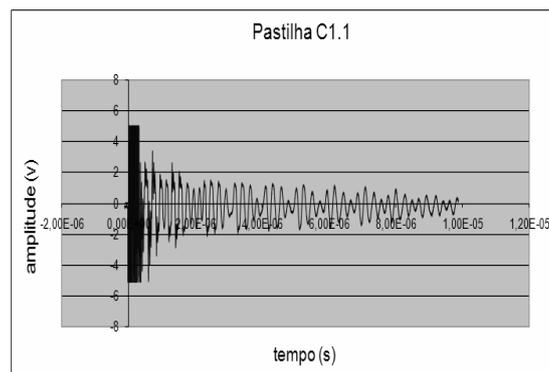
Comparando os valores das velocidades ultra-sônicas no domínio da frequência dos experimentos 1 e 2 pode ser notado que o uso do pulso inicial ocasiona uma grande influência no valor dos sinal (domínio da frequência). A tabela 35 mostra a comparação das diferenças apresentadas nas velocidades nos experimentos 1 e 2 -tendo como base

os valores de velocidades com a técnica convencional- com o uso da técnica proposta nas pastilhas C2.4 e E1.3 que tiveram os menores diferenças no experimento 2.

Tabela 35: comparação das diferenças nos experimentos 1 e 2

Pastilha	Diferença no experimento 1	Diferença no experimento 2
C2.4	1,80	0,06
E1.3	3,67	0,23

Isso prova que o pulso inicial tem uma grande influência nos valores das velocidades ultra-sônicas no domínio da frequência. Outra influência do pulso inicial é na forma do sinal no domínio da frequência que sem o uso do mesmo, o sinal fica mais definido como podemos verificar na figura 56 que mostra o sinal da pastilha C1.1 com e sem o pulso inicial.



(a)

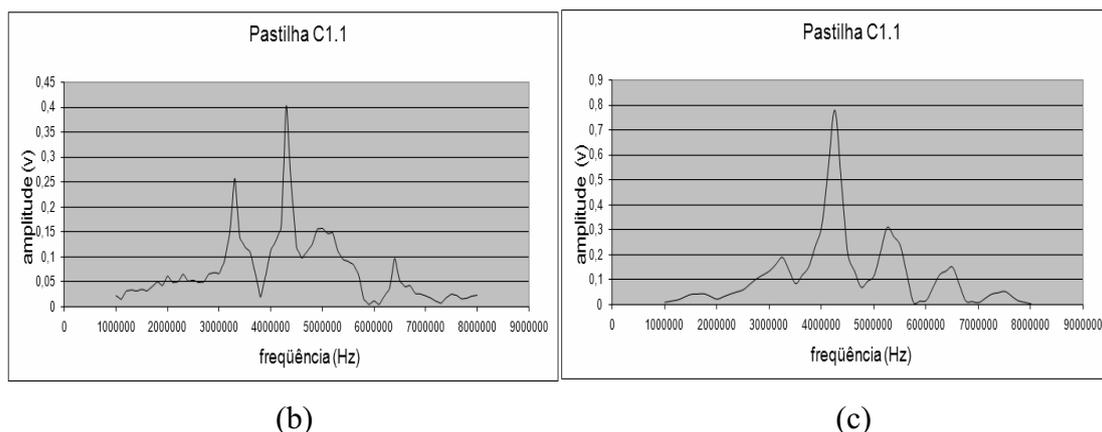


Figura 56: sinal no domínio do tempo da pastilha C1.1 (a); sinal no domínio da frequência com o pulso inicial (b) e sem o pulso inicial (c)

5.3. Terceiro experimento

O terceiro experimento tem por finalidade determinar a velocidade ultra-sônica utilizando a técnica proposta. Neste experimento foi comparada a técnica proposta com a técnica convencional utilizando um transdutor de ondas transversal. O material utilizado foi o mesmo dos experimentos 1, 2 e 3.

Os valores das velocidades ultra-sônica no domínio do tempo estão apresentados nas tabelas 36, 37, 38, 39 e 40 abaixo:

Tabela 36: Valores no domínio do tempo referentes ao grupo A

Pastilha (grupo A)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Tempo (s)	Velocidade (m/s)
A1.3	4,282	39,0	3,72 E-6	2303,15±6
A1.5	4,269	39,8	4,60 E-6	1856,08±5
A2.3	4,138	37,1	3,92 E-6	2111,2±7
A2.5	4,168	37,2	4,08 E-6	2043,13±6

Tabela 37: Valores no domínio do tempo referentes ao grupo B

Pastilha (grupo B)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Tempo (s)	Velocidade (m/s)
B1.3	3,952	28,5	1,92 E-6	4116,66±12
B1.4	4,008	29,7	1,96 E-6	4175,00±12
B2.3	3,972	28,7	1,88 E-6	4225,53±14
B2.5	4,012	28,7	1,92 E-6	4179,16±13

Tabela 38: Valores no domínio do tempo referentes ao grupo C

Pastilha (grupo C)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Tempo (s)	Velocidade (m/s)
C1.1	3,686	22,4	1,52 E-6	4850,00±16
C1.2	3,792	21,4	1,60 E-6	4740,00±15
C2.4	3,815	19,4	1,52 E-6	5019,73±15
C2.5	3,685	19,6	1,48 E-6	4979,72±14

Tabela 39: Valores no domínio do tempo referentes ao grupo D

Pastilha (grupo D)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Tempo (s)	Velocidade (m/s)
D1.3	3,658	11,1	1,28 E-6	5715,62±20
D1.5	3,511	11,9	1,24 E-6	5662,90±20
D2.3	3,634	10,6	1,28 E-6	5678,12±20
D2.5	3,584	10,4	1,26 E-6	5688,88±20

Tabela 40: Valores no domínio do tempo referentes ao grupo E

Pastilha (grupo E)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Tempo (s)	Velocidade (m/s)
E1.3	3,428	6,67	1,16 E-6	5910,34±23
E1.5	3,406	5,87	1,16 E-6	5872,41±22
E2.3	3,523	5,54	1,17 E-6	6022,22±24
E2.5	3,516	5,81	1,20 E-6	5860,00±21

Empregando a técnica convencional (determinação da velocidade ultra-sônica no domínio do tempo) foi possível determinar todos os tempos de percurso do sinal ultra-sônico.

A razão, da técnica convencional, ter sido capaz de determinar a velocidade do sinal quando passa no material foi devido ao sinal ser mais lento.

Os valores das velocidades ultra-sônica no domínio da frequência estão apresentados nas tabelas 41, 42, 43, 44 e 45 abaixo:

Tabela 41: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo A

Pastilha (grupo A)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
A1.3	4,282	39,0	260 E3	2226,64±22
A1.5	4,269	39,8	220 E3	1878,36±21
A2.3	4,138	37,1	255 E3	2110,38±22
A2.5	4,168	37,2	250 E3	2084,00±22

Tabela 42: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo B

Pastilha (grupo B)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
B1.3	3,952	28,5	513 E3	4054,75±22
B1.4	4,008	29,7	515 E3	4128,24±22
B2.3	3,972	28,7	525 E3	4170,60±22
B2.5	4,012	28,7	520 E3	4172,48±23

Tabela 43: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo C

Pastilha (grupo C)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
C1.1	3,686	22,4	650 E3	4791,80±22
C1.2	3,792	21,4	635 E3	4815,84±22
C2.4	3,815	19,4	650 E3	4959,50±23
C2.5	3,685	19,6	688 E3	5070,56±22

Tabela 44: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo D

Pastilha (grupo D)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
D1.3	3,658	11,1	775 E3	5669,90±23
D1.5	3,511	11,9	800 E3	5617,60±23
D2.3	3,634	10,6	775 E3	5632,70±23
D2.5	3,584	10,4	785 E3	5626,88±23

Tabela 45: Valores no domínio da frequência referentes ao grupo E

Pastilha (grupo E)	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
E1.3	3,428	6,67	850 E3	5827,60±24
E1.5	3,406	5,87	850 E3	5790,20±23
E2.3	3,523	5,54	845 E3	5953,87±25
E2.5	3,516	5,81	835 E3	5871,72±24

A figura 57 demonstra um comparativo entre os valores das velocidades com o transdutor transversal utilizando a técnica convencional e com a técnica proposta.

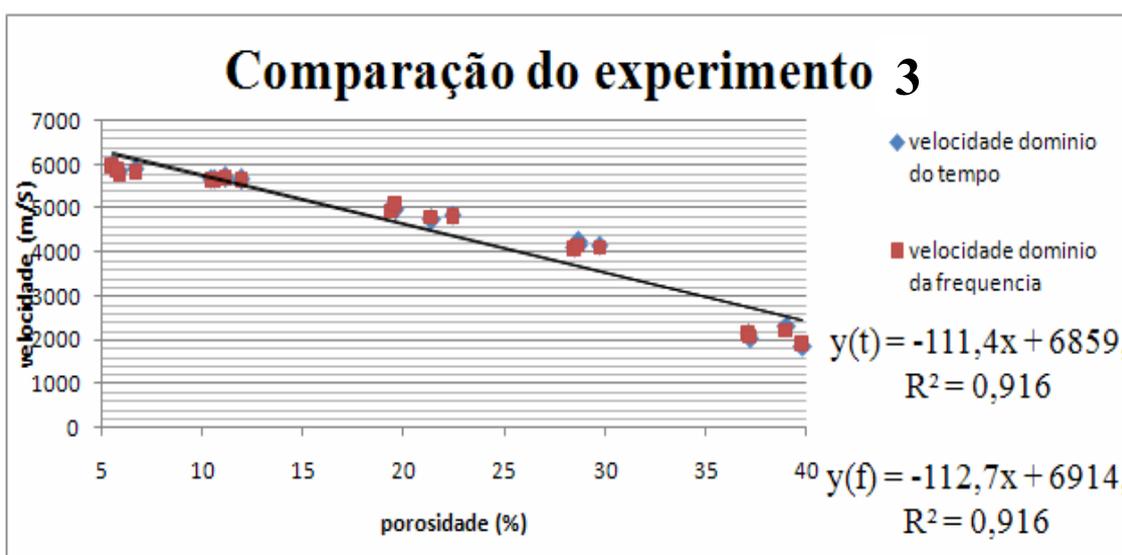


Figura 57: Comparação das velocidades no experimento 3

O gráfico mostra que os valores encontrados com a técnica proposta (domínio da frequência) possuem o mesmo padrão encontrado com a técnica convencional (domínio do tempo).

Os valores das diferenças entre as duas técnicas estão apresentados a seguir:

Tabela 46: Diferenças referentes ao grupo A

Pastilhas do grupo A	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
A1.3	2303,15	2226,64	3,32
A1.5	1856,08	1878,36	1,20
A2.3	2111,2	2110,38	0,03
A2.5	2043,13	2084,00	2,00

Tabela 47: Diferenças referentes ao grupo B

Pastilhas do grupo B	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
B1.3	4116,66	4054,75	1,50
B1.4	4175,00	4128,24	1,12
B2.3	4225,53	4170,6	1,29
B2.5	4179,16	4172,48	0,15

Tabela 48: Diferenças referentes ao grupo C

Pastilhas do grupo C	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
C1.1	4850,00	4791,80	1,20
C1.2	4740,00	4815,84	1,60
C2.4	5019,73	4959,50	1,19
C2.5	4979,72	5070,56	1,82

Tabela 49: Diferenças referentes ao grupo D

Pastilhas do grupo D	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
D1.3	5715,62	5669,90	0,79
D1.5	5662,90	5617,60	0,79
D2.3	5678,12	5632,70	0,80
D2.5	5688,88	5626,88	1,08

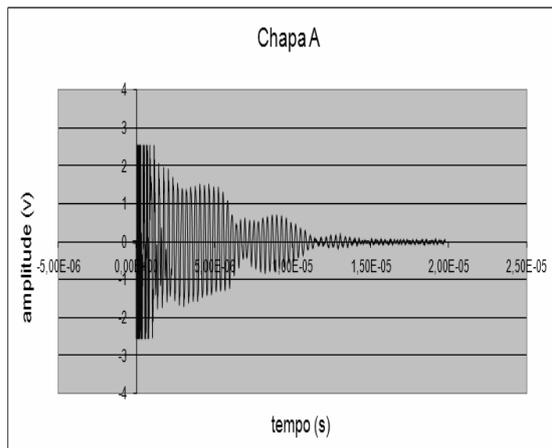
Tabela 50: Diferenças referentes ao grupo E

Pastilhas do grupo E	Velocidade (técnica convencional)	Velocidade (técnica proposta)	Diferença (%)
E1.3	5910,34	5827,60	1,39
E1.5	5872,41	5790,20	1,40
E2.3	6022,22	5953,87	1,13

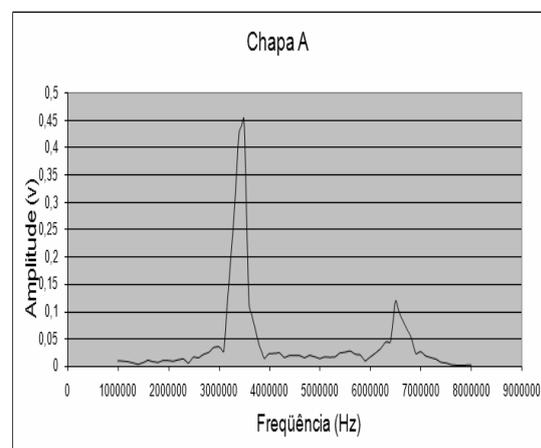
Como é possível verificar os valores das diferenças encontradas neste experimento são pequenos, tendo o valor máximo da diferença em 3,32% e o menor valor em 0,03%. Isso confirma que os resultados da técnica proposta estão dentro do padrão encontrado com a técnica convencional.

5.4. Quarto experimento

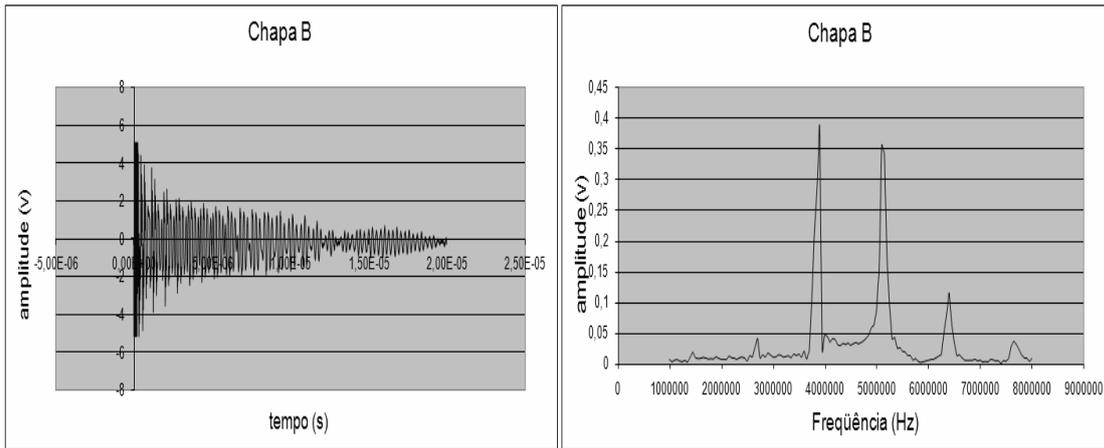
O quarto experimento não possuía uma forma de comparar os resultados com as duas técnicas, pois no domínio do tempo os ecos estão todos sobrepostos impossibilitando assim a determinação do tempo de percurso utilizando o programa chronos como pode ser observado na figura 58. O experimento 4 teve como objetivo determinar as espessuras das chapas de alumínio. Para a determinação das espessuras foi usado uma velocidade tabelada para o alumínio (ver tópico 4.4.4) e o delta de frequência. Com as espessuras calculadas foram verificadas as diferenças (tabela 51) comparando com as espessuras medidas.



(a1)

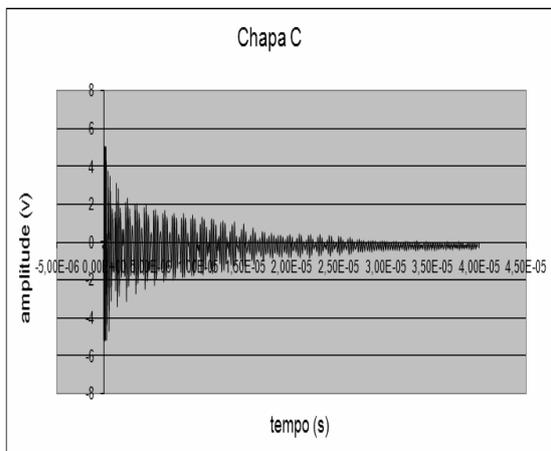


(a2)

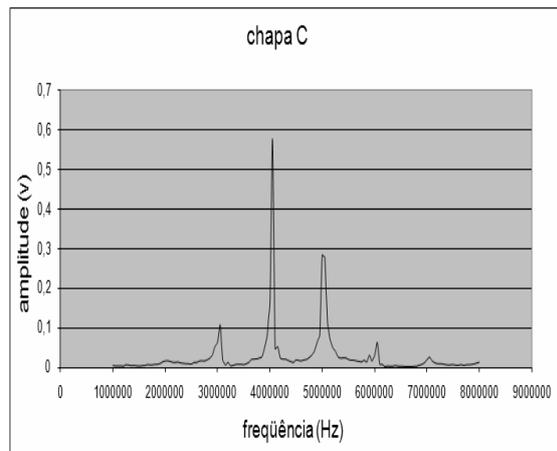


(b1)

(b2)



(c1)



(c2)

Figura 58: a1(sinal no domínio do tempo da chapa A), a2 (sinal no domínio da freqüência da chapa A), b1(sinal no domínio do tempo da chapa A), b2 (sinal no domínio da freqüência da chapa B), c1 (sinal no domínio do tempo da chapa A) e c2 (sinal no domínio da freqüência da chapa C).

Tabela 51: Valores das espessuras encontrados a partir da técnica proposta.

Chapa de alumínio	Espessura medida (mm)	Freqüência (Hz)	Espessura determinada pela técnica proposta (mm)	Diferença (%)
A	0,94	3,3 E6	0,9575	1,86
B	2,47	1,3 E6	2,4307	1,59
C	3,32	960 E3	3,2916	0,85

A diferença apresentado neste experimento foi baixo, assim como nos outros experimentos. Mesmo nos casos das chapas A e B onde não foi excluído o pulso inicial.

5.5. Quinto experimento

O sexto experimento tem por objetivo iniciar os estudos sobre o método por imersão. Este experimento calcula a espessura da chapa de alumínio B utilizando as duas técnicas (convencional e proposta) e comparara-las com a espessura medida pelo micrômetro. Foram determinados os diferenças com as duas técnicas (tabelas 52 e 53). Os sinais com as duas técnicas são mostrados na figura 59 abaixo.

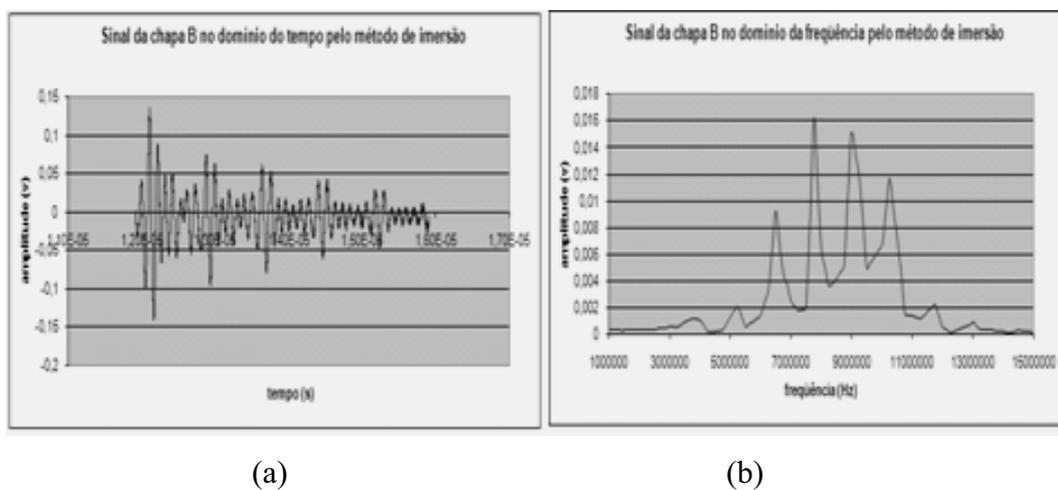


Figura 59: Sinal da chapa B usando o método por imersão no domínio do tempo (a); sinal no domínio da frequência (b)

Tabela 52: Valores das espessuras encontrados a partir da técnica convencional.

Técnica	Tempo (s)	Espessura encontrada (mm)	Diferença (%)
Convencional	7,76 E-7	2,452	0,0072

Tabela 53: Valores das espessuras encontrados a partir da técnica proposta.

Técnica	Frequência (Hz)	Espessura	Diferença (%)
---------	-----------------	-----------	---------------

		encontrada (mm)	
Proposta	1,29 E6	2,449	0,0085

6. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo apresentar uma técnica alternativa para caracterizar e determinar a velocidade ultra - sônica pelo domínio da frequência. Objetivo este que foi alcançado. Esta técnica não veio em hipótese alguma descartar a utilização de outras técnicas como a técnica convencional de realizar análise da velocidade ultra – sônica, mas vem servir de meio alternativo quando a técnica convencional se torna difícil de utilização em alguns casos como foi mostrado no decorrer do trabalho.

As conclusões deste trabalho são:

- 1) A técnica proposta apresentou resultados de medida de tempo de percurso da onda ultra-sônica próximos aos obtidos com a técnica convencional.
- 2) A técnica proposta apresentou resultados com poucas diferenças com a técnica convencional em todos os métodos ultra-sônicos utilizado neste trabalho (contato usando transdutor longitudinal, transversal e por imersão).
- 3) A exclusão do pulso inicial apresenta resultado mais preciso, pois só o sinal ultra-sônico no domínio do tempo que percorre o material é transformado para a frequência.
- 4) A técnica do domínio da frequência foi capaz de determinar o tempo de percurso do sinal ultra-sônico, mesmo quando a técnica do domínio do tempo não foi capaz de determinar, como no caso da pastilha A1.5.

Trabalhos futuros

- 1) Desenvolvimento de um software para aprimoramento da técnica, onde nele exista a possibilidade de realizar o cálculo dos intervalos de frequência (Δf), assim como a transformação direta do domínio do tempo para o domínio da frequência. Com isso pretende-se otimizar a análise dos dados com a técnica proposta, além da obtenção de dados mais precisos para trabalhos futuros.

- 2) Utilização da técnica proposta para avaliação de tensões em materiais. Realização de diversos experimentos para verificar a possibilidade da técnica proposta possuir a resolução necessária para verificar as pequenas variações de tempo que acontecem em decorrência das tensões.

7. Referência Bibliográfica

[1]Korea Atomic Energy Research Institute, Nuclear Training Center. Nuclear Power Reactor Tecnology. Disponível em: <http://www.kntc.re.kr/openlec/nuc/NPRT> . Acesso em: 20 de janeiro. 2010.

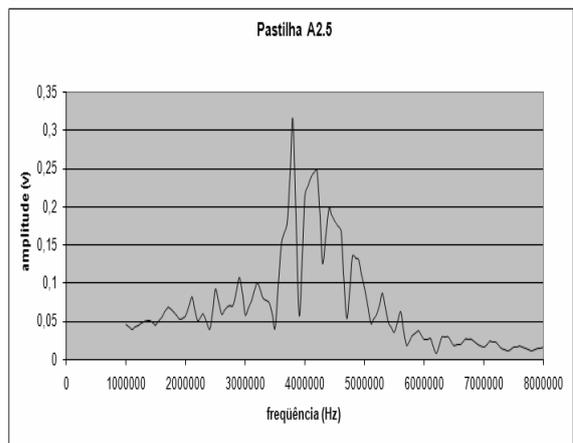
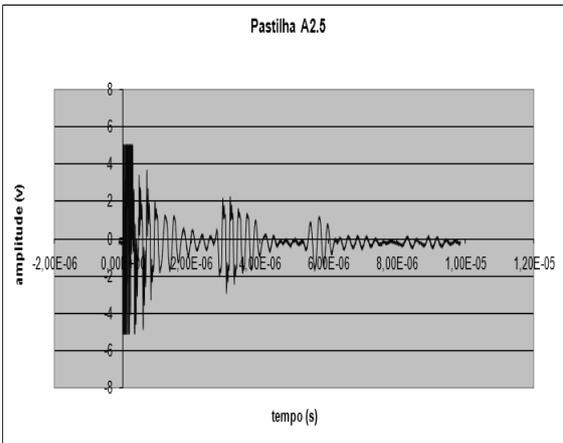
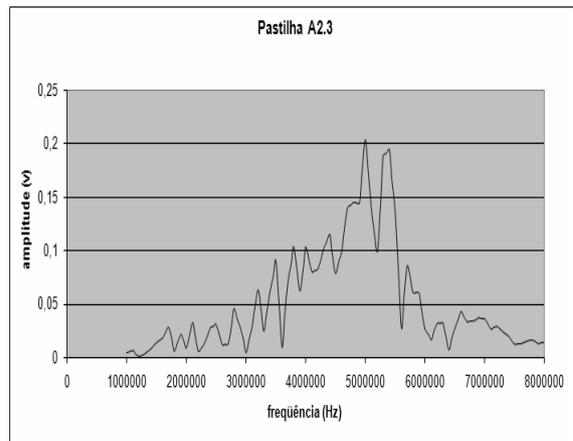
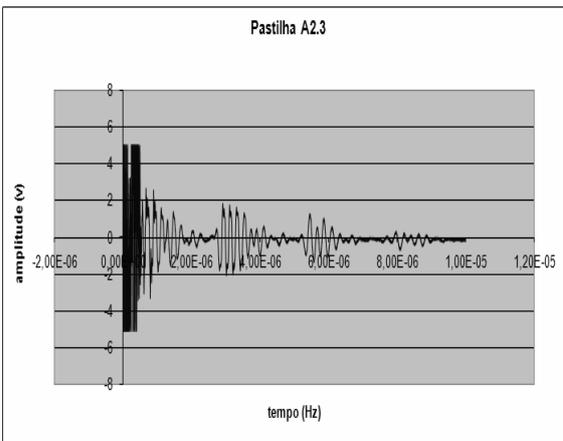
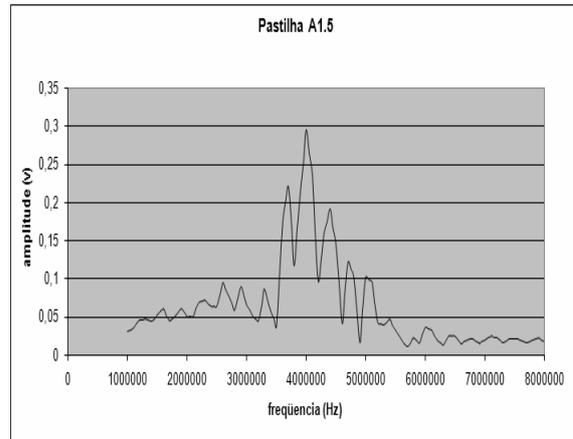
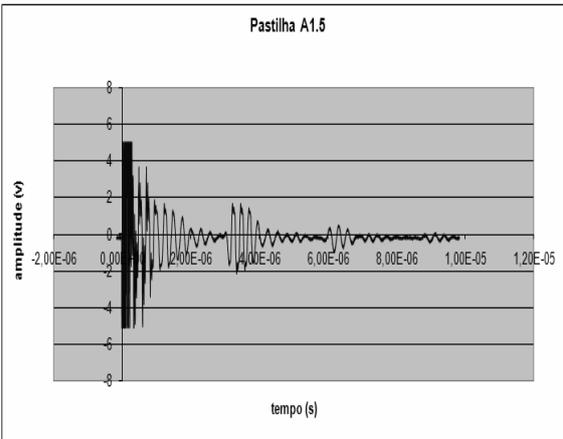
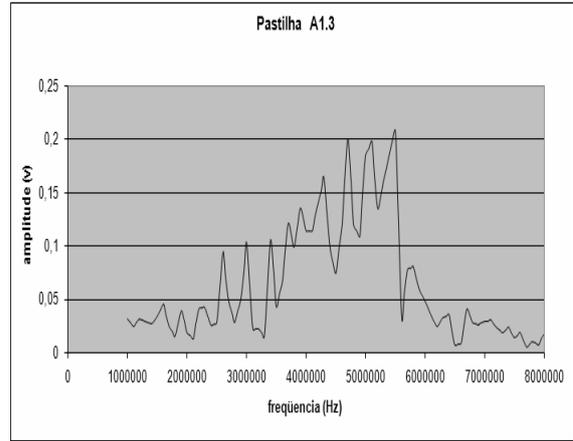
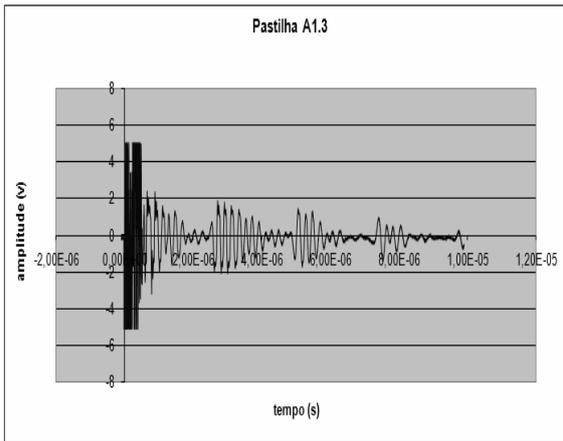
[2]IAEA Safeguards Agreements and Additional Protocols. Verifying Compliance with Nuclear Non-Proliferation Undertakings. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/>. Acesso em: 20 de janeiro. 2010.

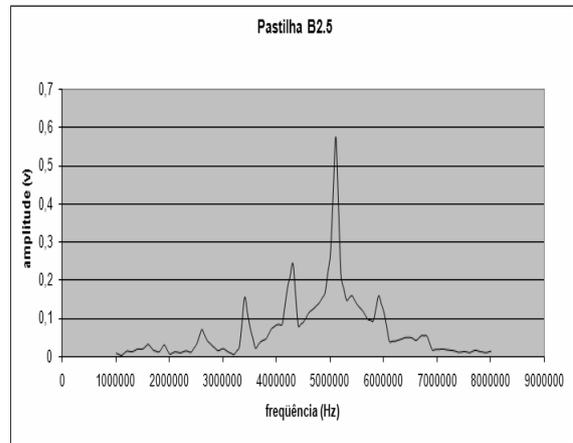
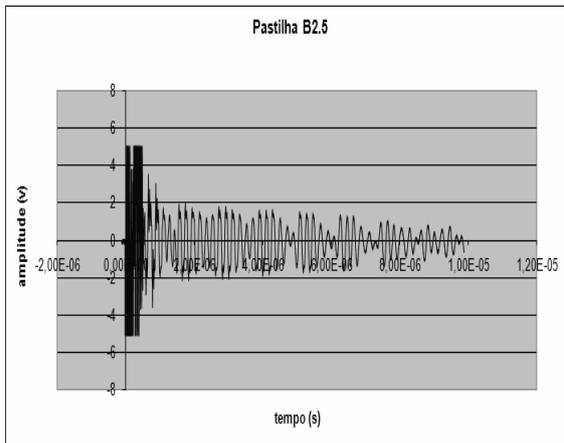
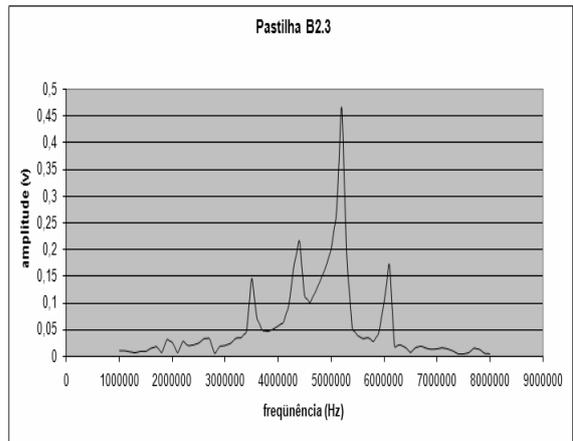
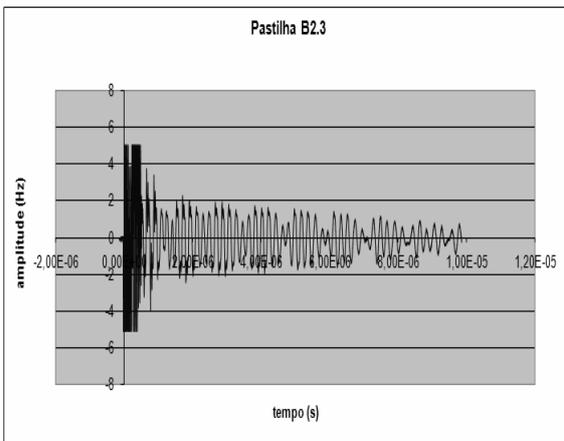
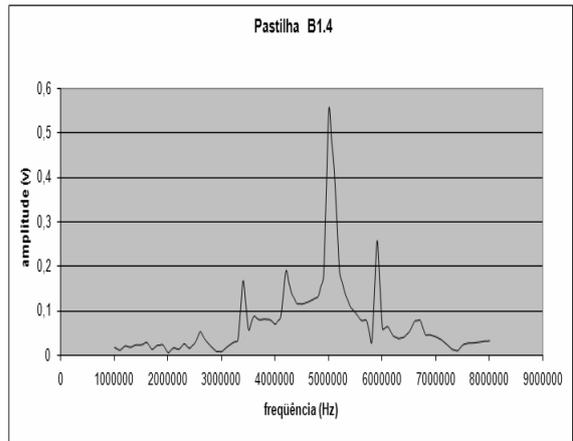
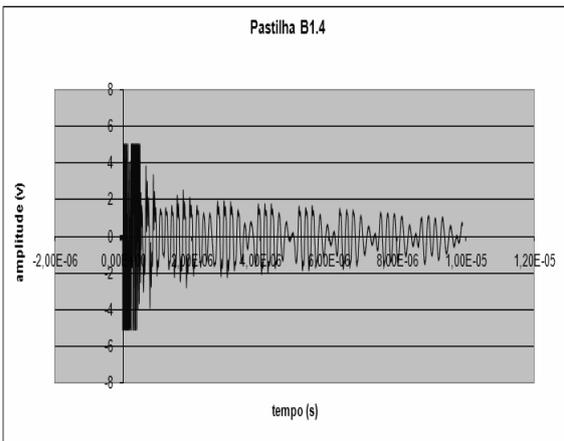
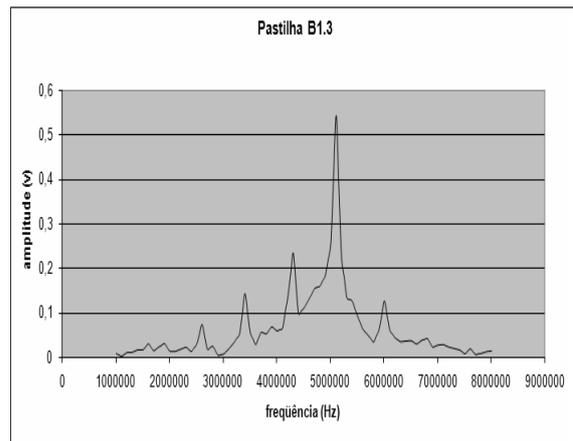
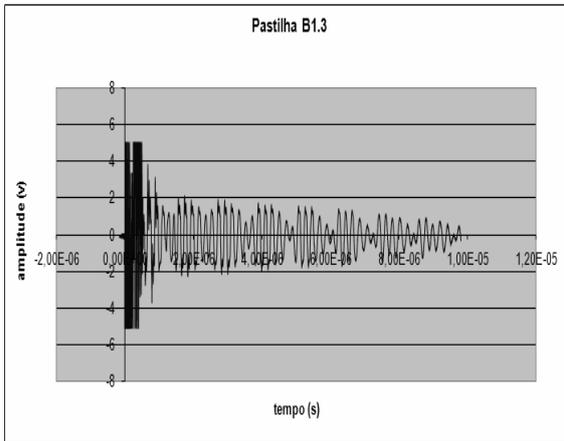
- [3] International Atomic Energy Agency. Sustainable development & Nuclear Power. Disponível em: <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Development/index.html>. Acesso em: 15 de janeiro. 2010.
- [4] International Nuclear Safety Center. INSC Material Properties Database. Disponível em: <http://www.insc.anl.gov/matprop/>. Acesso em: 22 de janeiro. 2010.
- [5] Santin, Jorge Luiz. Ultra – Som, Técnica e Aplicação. Petrobras, Curitiba, Paraná, 2003.
- [6] Andreucci, Ricardo. Ensaio por ultra-som, Aspectos básicos. Associação brasileira de ensaios não destrutivos. 3a Edição. 2002.
- [7] Bittencourt, Marcelo de Siqueira Queiroz. Desenvolvimento de um sistema de medida de tempo decorrido da onda ultra-sônica e análise do estado de tensões em materiais metálicos pela técnica da birrefringência acústica. Tese (Doutorado). Programa de Pós - Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, 2000.
- [8] Krüger, S. E. Caracterização microestrutural de ferros fundidos por ultra - som. Tese (Doutorado). Programa de Pós - Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, 1999.
- [9] Berutti, Felipe Amorim. Aplicação de métodos de ultra-som para avaliação e caracterização da microestrutura de materiais cerâmicos à base de alumina e sua associação com propriedades mecânicas. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.
- [10] Penha, R. M.L.da. Análise de Sinais em regime transiente aplicando a técnica de wavelet. Dissertação de Mestrado. Curso de Mestrado em Ciências na área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear/Ipen. São Paulo, 1999.
- [11] Smith, Steven W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Disponível em: Acesso em: <http://www.dspsguide.com/> 20 de ago. 2009.
- [12] Joaquim, Marcelo B. Análise de Fourier. São Carlos, SP: EESC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003. Cd-rom.
- [13] Haykin, Simon; Veen, Barry V. Sinais e sistemas / tradução José Carlos Barbosa dos Santos. Porto Alegre: Bookman, 2001.

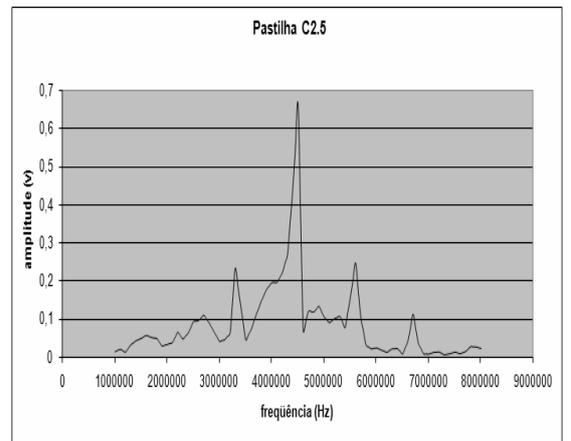
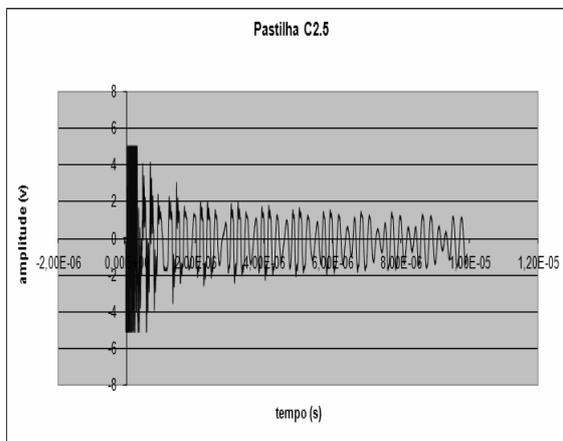
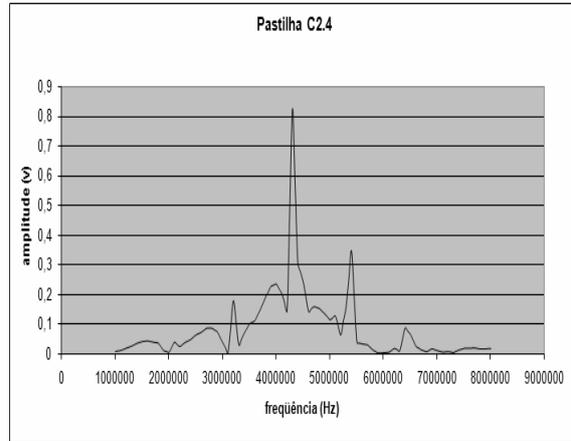
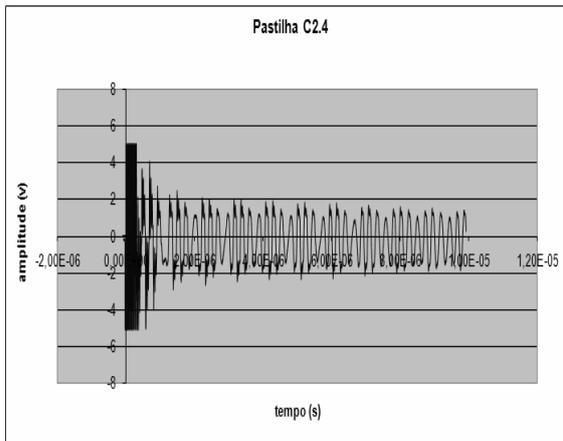
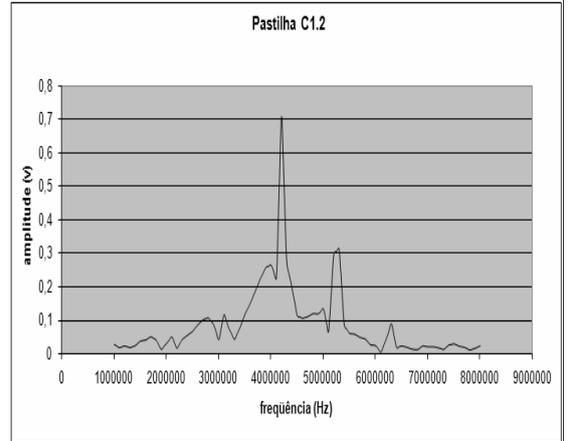
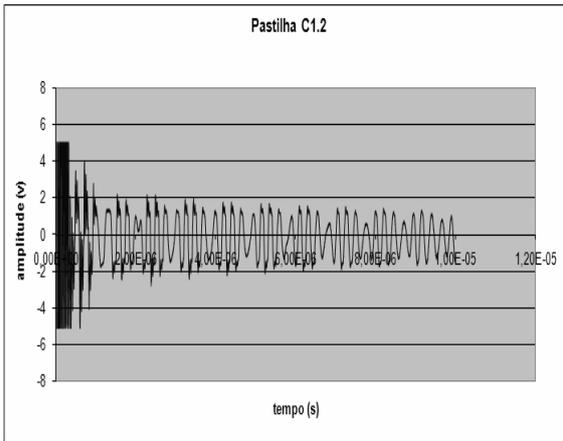
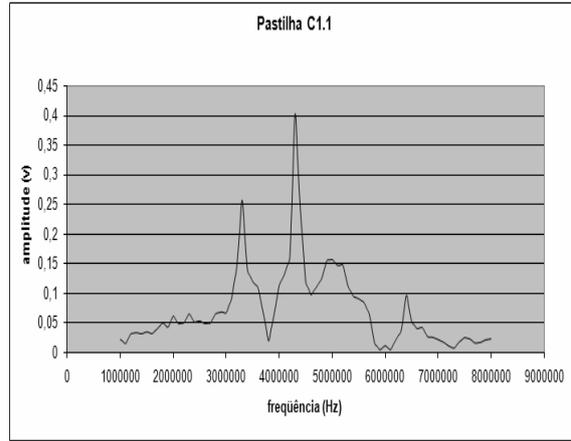
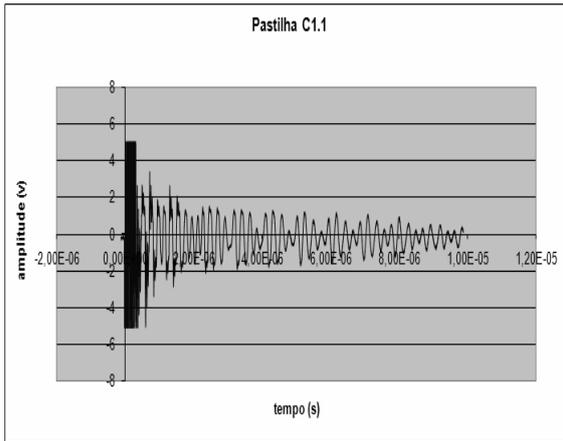
- [14] Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Processamento Digital de Sinal. Disponível em: http://paginas.fe.up.pt/~ajf/pds/aulas_teoricas.html. Acesso em: 03 de jul. 2009.
- [15] Departamento de Engenharia elétrica, Sistemas e Sinais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: Disponível em: http://paginas.fe.up.pt/~ajf/pds/aulas_teoricas.html. Acesso em: 29 de mai. 2010.
- [16] Kögler, João. Série de Fourier e Transformada de Fourier – I. Disponível em: <http://jkogler.wordpress.com/2008/06/23/serie-de-fourier-e-transformada-de-fourier-i/>. Acesso em: 30 de mar. 2009.
- [17] Morettin, Pedro. A. Análise Harmônica de Processos Estocásticos. Rio de Janeiro: 12º Colóquio Brasileiro de Matemática, IMPA, 1979.
- [18] Costa, Antonio M. L. M. Estudo da Influência das Micro-estruturas e da Porosidade de Pastilhas de Alumina no Pulso Ultra-sônico no Domínio da Frequência. Rio de Janeiro: Instituto de Engenharia Nuclear, 2009. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós - Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares, Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2009.
- [19] Baroni, Douglas B. Desenvolvimento de técnica ultra – sônica para medida de porosidade em pastilhas de UO₂. Rio de Janeiro: Instituto de Engenharia Nuclear, 2008. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós - Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares, Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2008.
- [20] Correia, Diogo C; Laskoski, Gustavo T. Transformada de Fourier Discreta: Processamento Digital de Sinais. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- [21] Dutra, Marco A.M. Avaliação Acustelástica Do Aço 20 MnMoNi55, Material Estrutural Do Vaso De Pressão Dos Reatores Nucleares De Angra II E III. Rio de Janeiro: Instituto de Engenharia Nuclear, 2009. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós - Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares, Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2009.
- [22] Gómez, Francisco R.; Zolder, Miguel A. F.; Morcillo, Gabriel D.;. Introducción a los métodos de ensayos no destructivos de control de La calidad de los materiales. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). 2ª edição. Madrid, 1990.
- [23] Portes, Mariluci F. Cálculo Numérico. IME. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ime.uerj.br/professores/Mariluci>. Acesso em: 03 de fev. 2010.

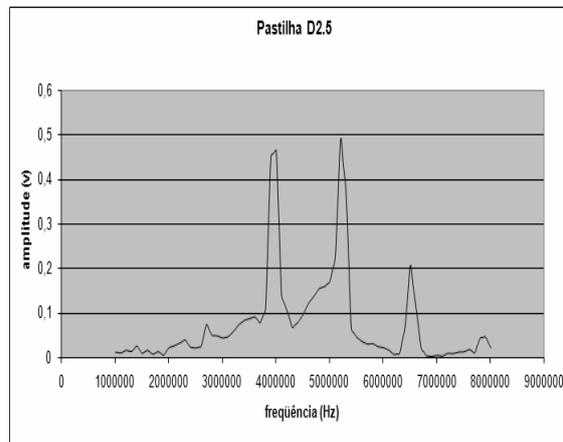
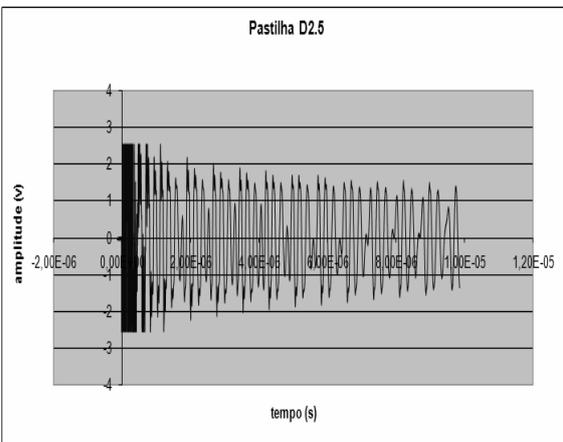
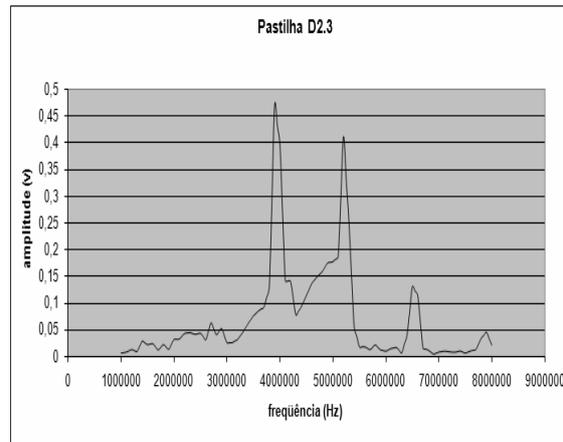
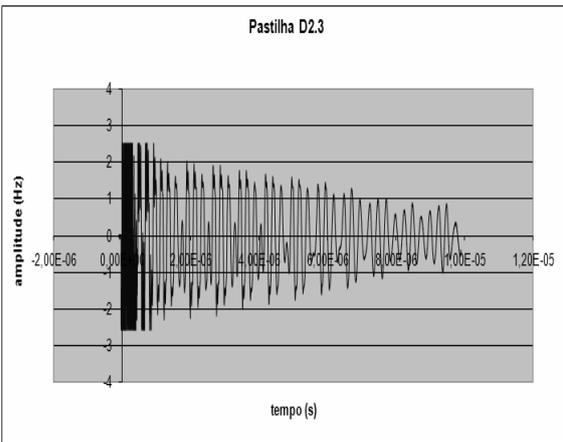
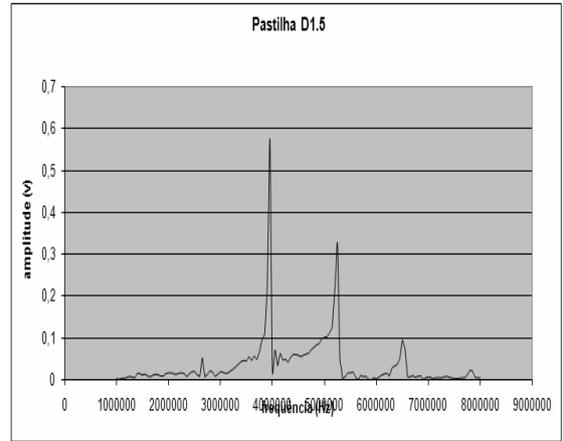
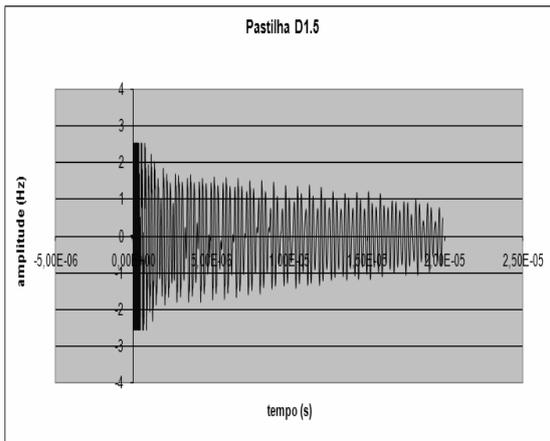
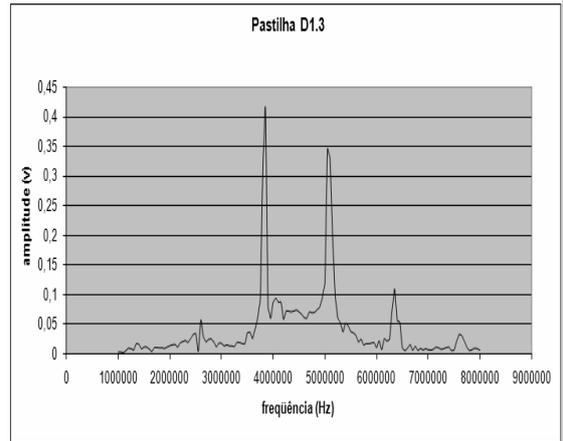
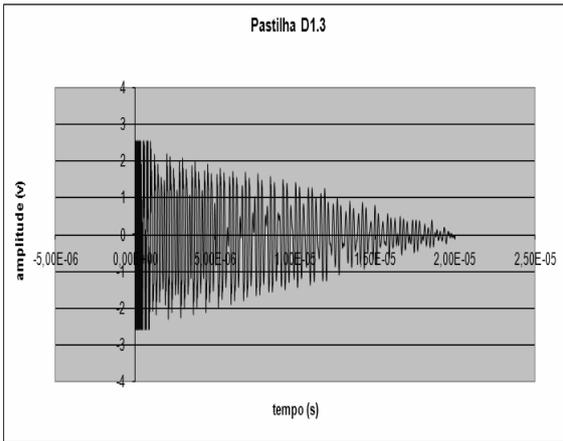
Anexo 1

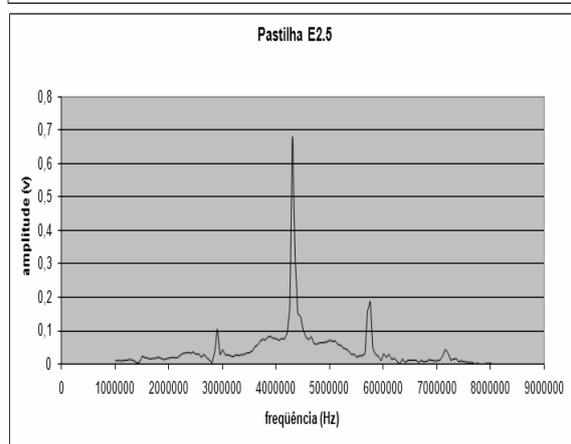
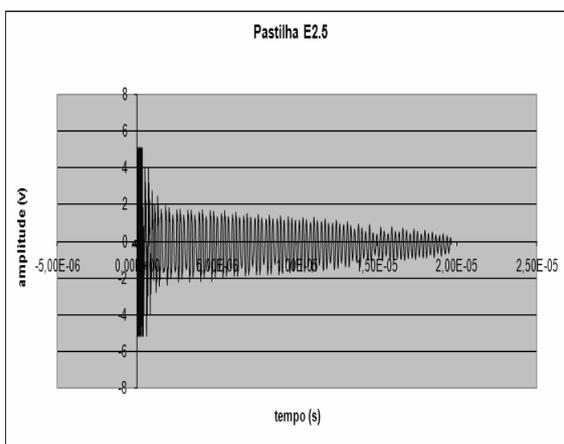
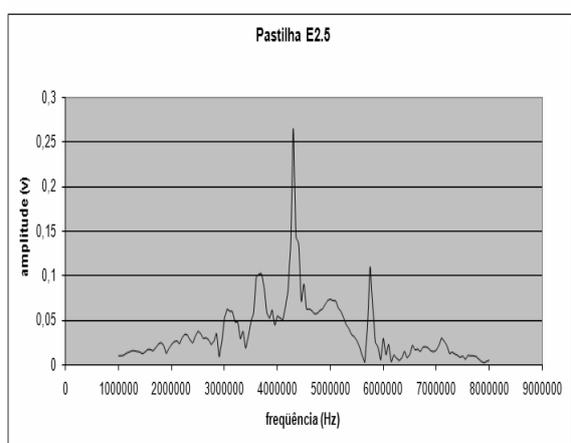
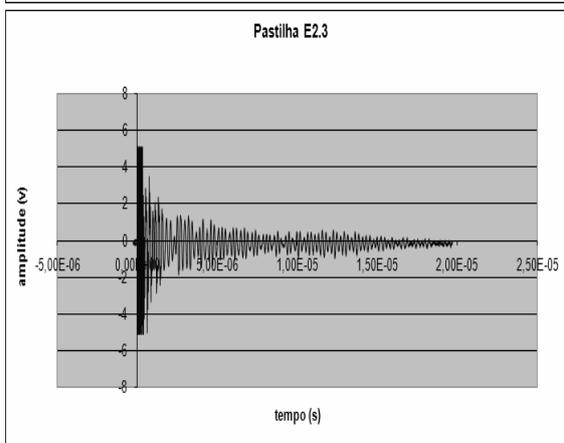
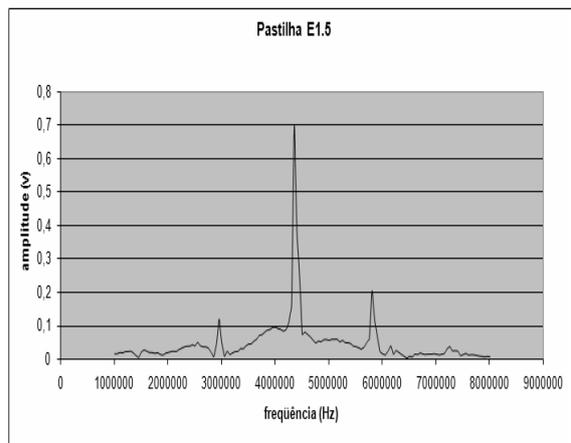
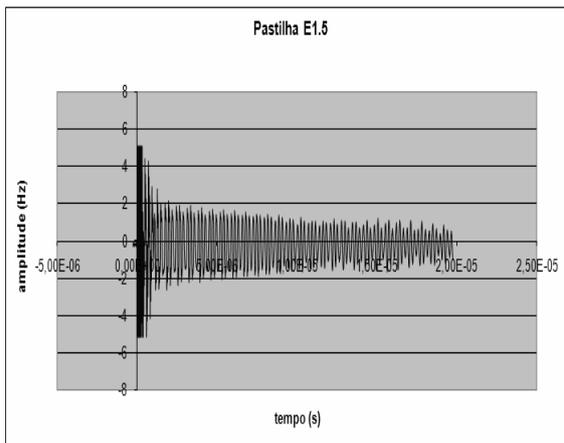
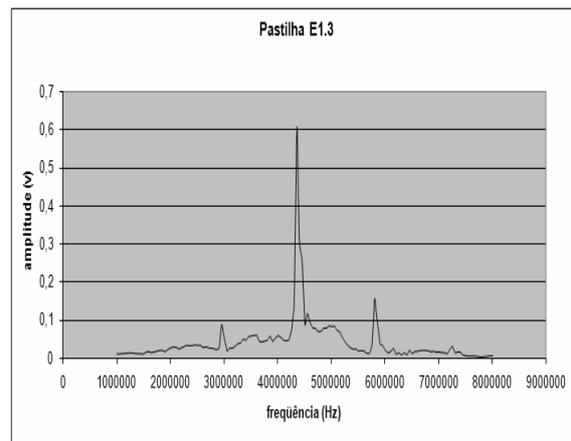
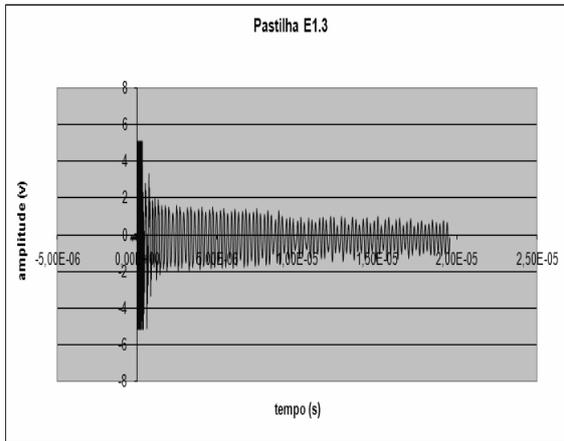
Experimento 1





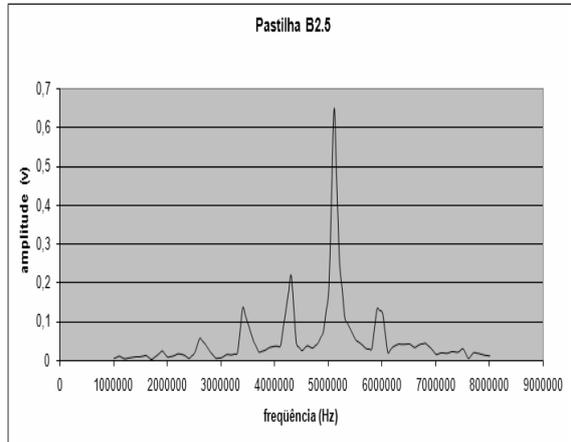
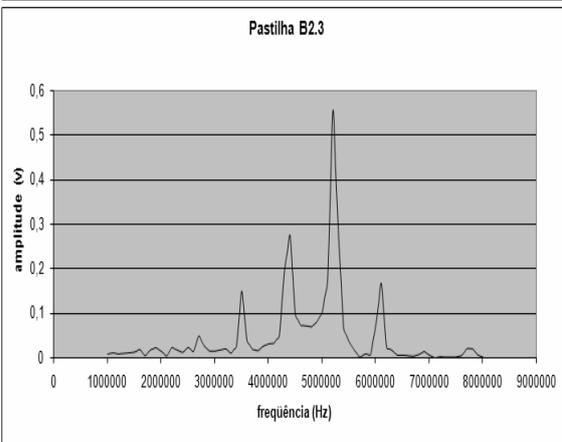
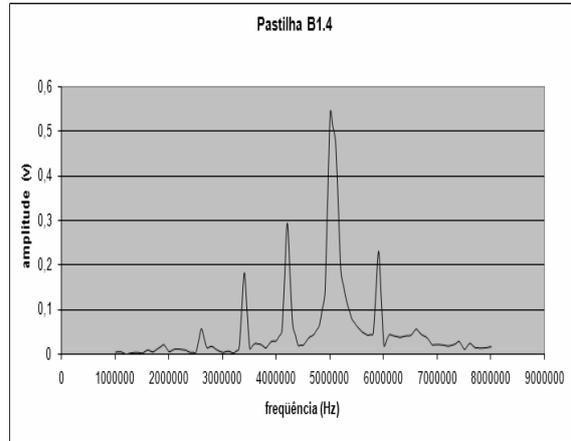
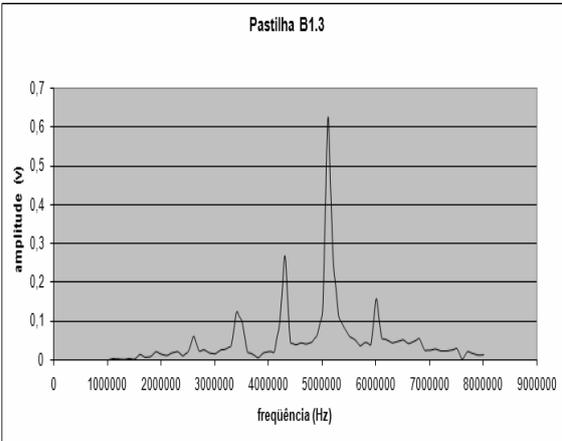
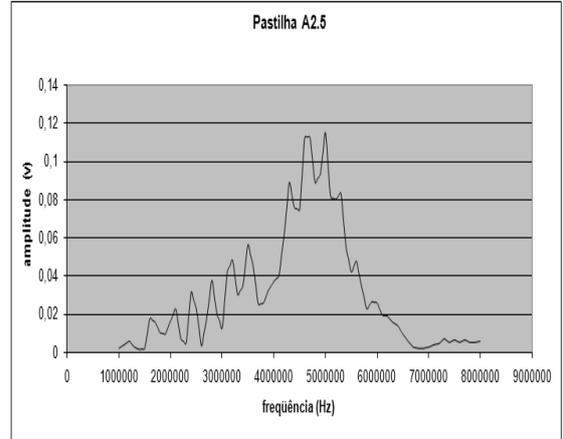
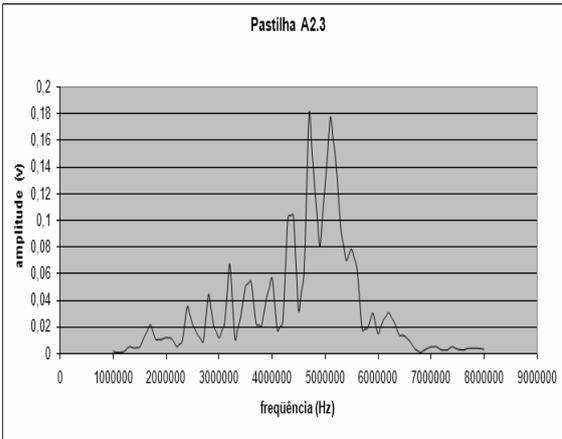
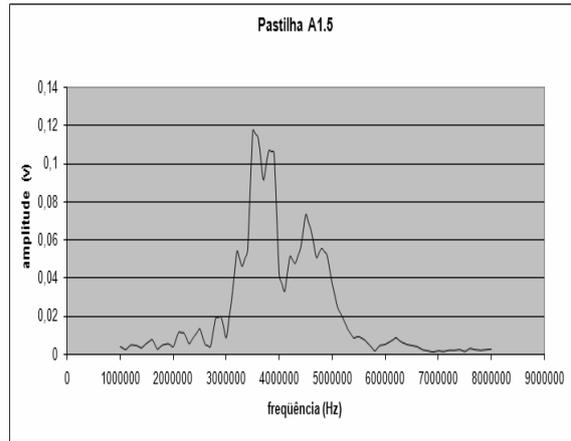
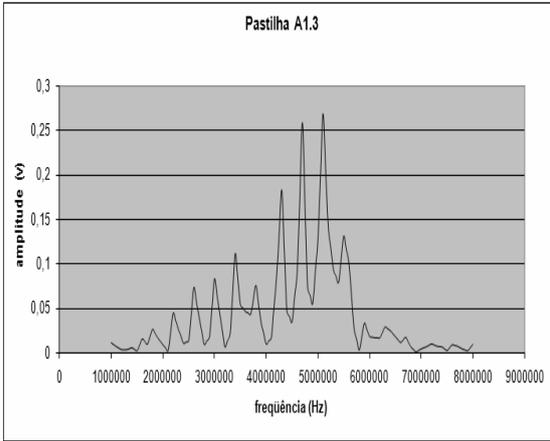


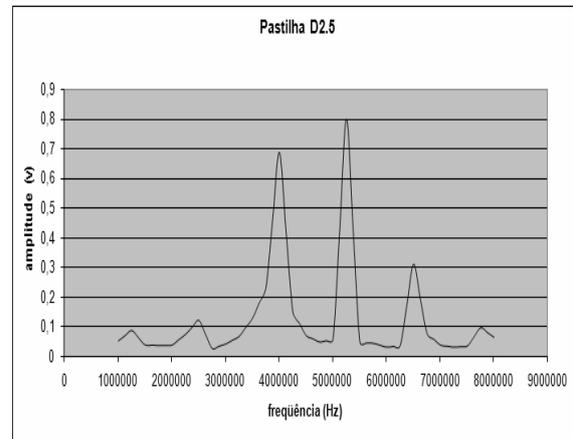
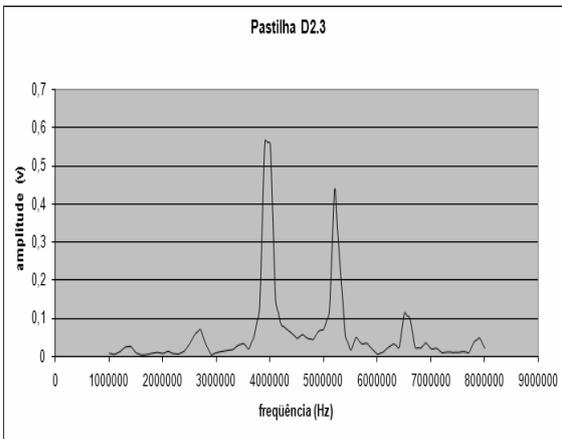
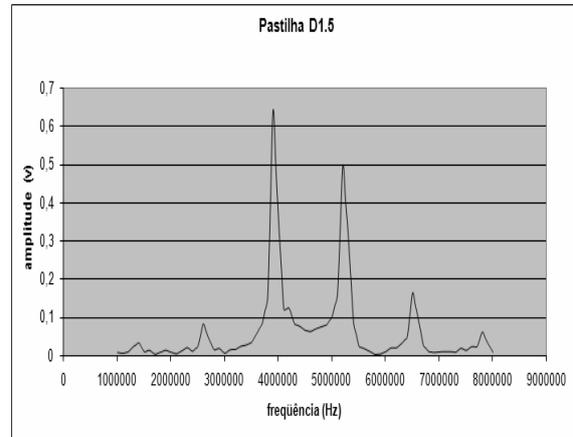
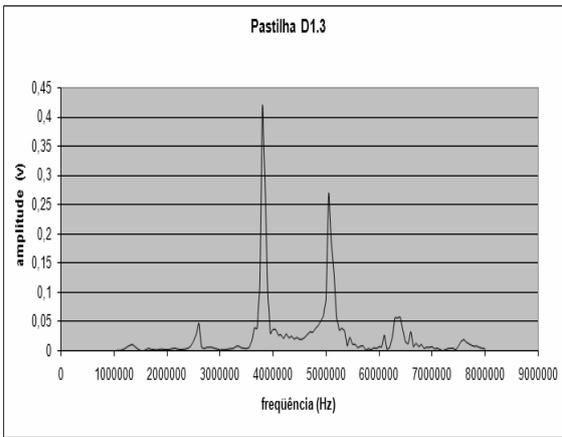
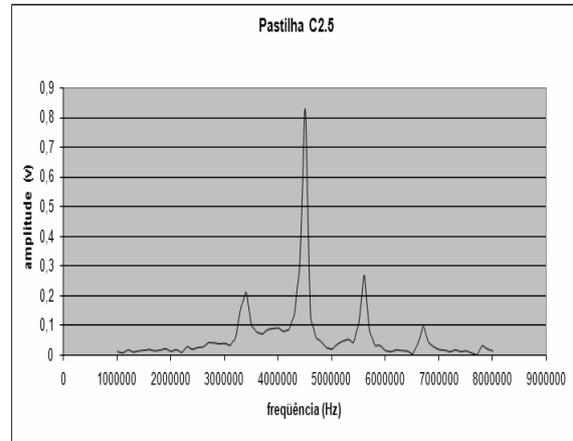
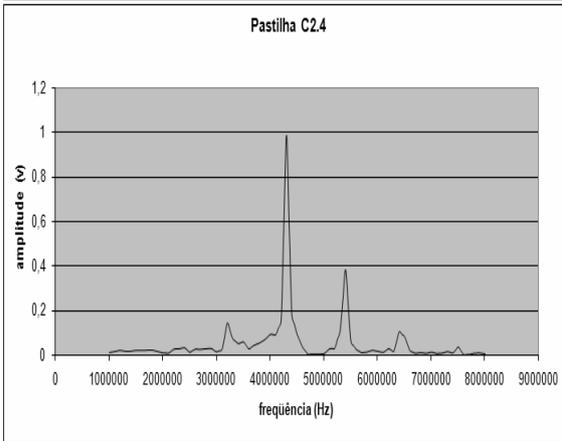
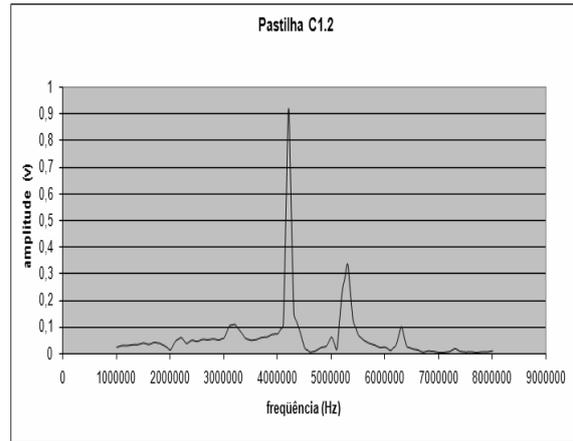
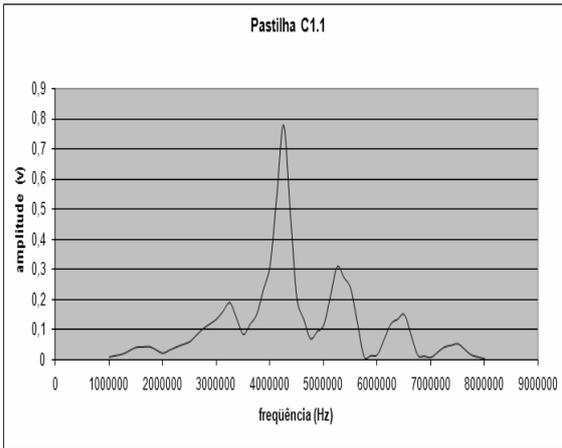


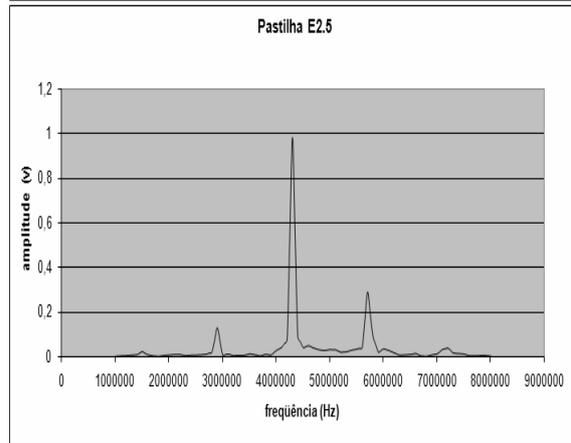
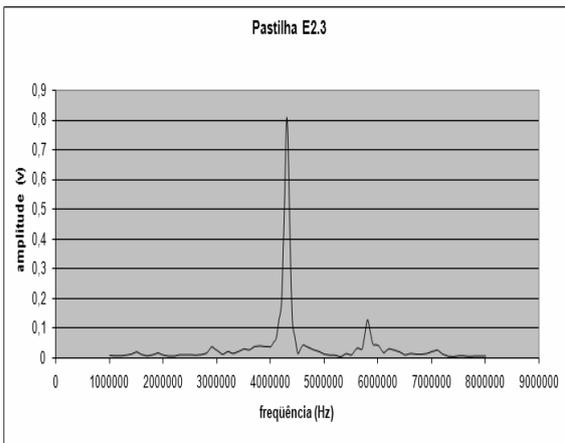
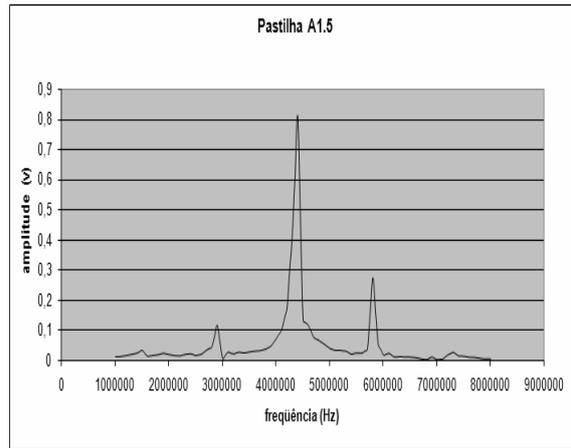
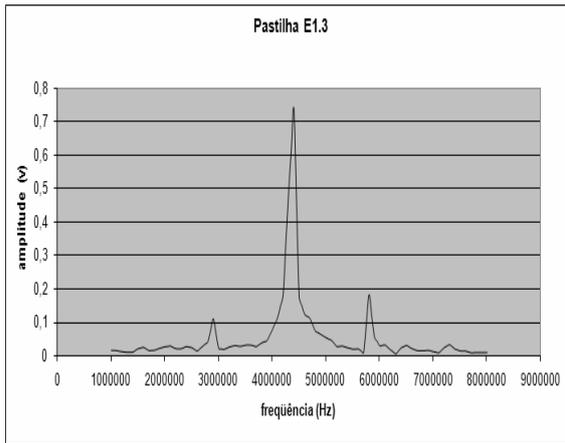


Anexo 2

Experimento 2







Anexo 3

Experimento 3

