



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Instituto Politécnico

Regildo Batista do Sacramento Manuel

Estimativa da espessura de concreto utilizando o método do eco – impacto

Nova Friburgo
2014

Regildo Batista do Sacramento Manuel

Estimativa de espessura do concreto utilizando o método do eco - impacto



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

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis
Prof. Dr. José Renato de Castro Pessôa

Nova Friburgo
2014

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

M294 Manuel, Regildo Batista do Sacramento.
Estimativa da espessura do concreto utilizando o método do
eco – impacto / Regildo Batista do Sacramento Manuel.- 2014.
106 f. : il.

Orientadores: Joaquim Teixeira de Assis e José Renato de
Castro Pessoa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Testes não-destrutivos – Teses. 2. Concreto – Teses. 3.
Materiais - Testes de compressão – Teses. 4. Medidas de
espessura – Teses. 5. Análise plástica (Teoria das estruturas) –
Teses. 6. Ruína de estruturas – Modelos matemáticos – Teses. 7.
Testes ultra-sonico – Teses. I. Assis, Joaquim Teixeira de. II.
Pessoa, José Renato de Castro. III. Universidade do Estado do Rio
de Janeiro. Instituto Politécnico. IV. Título.

CDU 620.172/.179: 624.012.4

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese,
desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Regildo Batista do Sacramento Manuel

Estimativa da espessura de concreto utilizando o método do eco – impacto

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

Aprovada em 28 de março de 2014.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis (Orientador)

Instituto Politécnico – UERJ

Prof. Dr. José Renato de Castro Pessôa (Orientador)

Instituto Politécnico – UERJ

Prof. Dr. Gil de Carvalho – UERJ

Instituto Politécnico – UERJ

Prof. Dr. Norberto Cella

Instituto Politécnico – UERJ

Prof. Dr. Vladimir Ivanovitch Monin

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC

Nova Friburgo
2014

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido o Dom da vida.

Aos meus pais Duarte *in memoriam* e Leonilda Batista pelo amor, paciência e apoio que sempre me dedicaram.

À minha esposa Joyce Amaral pelo amor, carinho, compreensão, incentivo e momentos de ternura, este trabalho também é seu.

Aos meus irmãos Dionísio, Maria da Penha, Semôa, Aquilino e Luís pelo incondicional incentivo. Aos meus cunhados Ivy e Bruno Amaral e Cleber Monteiro pela força e momentos de descontração.

Ao prof. Joaquim Teixeira de Assis e José Renato pelo incentivo, amizade e orientação deste trabalho.

Aos prof. Norberto Cella, Gil de Carvalho, pelo apoio, discussões e diálogo durante a pesquisa.

Ao técnico do Laboratório Aluísio Schuabb do Departamento de Eletrônica do Instituto Politécnico do Rio de Janeiro (IPRJ/UERJ), pretendo manifestar a minha profunda gratidão pela ajuda, dedicação de horas perdidas, para realização deste trabalho. Um muito obrigado.

À Rosemary (“Rose”) minha mãe de coração, obrigado pelo incentivo e contribuição na minha vida pessoal e intelectual.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES pelo apoio financeiro.

Aos companheiros de aventura que deram apoio quando o caminho se tornava mais escuro. Apesar de igualmente tormento pelo seu trabalho, encontraram sempre tempo e disposição para ouvir, aconselhar e ajudar no que fosse necessário. Leandro Blass, Otoniel, Jailson, Mauro, Marcenilda, Geysa, Ricardo, muito obrigados e boa sorte.

A todos aqueles que gentilmente colocaram à minha disposição os materiais necessários para realizar deste trabalho, a todos muito obrigado.

RESUMO

MANUEL, Regildo Batista do Sacramento. *Estimativa da espessura do concreto utilizando o método do eco-impacto*. 2014. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2014.

Nesta pesquisa utilizou-se um equipamento experimental que utiliza o método do eco-impacto produzido no Laboratório de Ensaios Físicos do Instituto Politécnico do Rio de Janeiro (UERJ/IPRJ), para estimar a espessuras de placas de concreto através da propagação de ondas de tensão geradas por um impacto. Para determinação dessa espessura, foram investigados vários mecanismos de estruturação do protótipo do equipamento com objetivo de se obter a melhor leitura possível, por meio das literaturas existentes. Entre parâmetros avaliados no estudo, estava o modelo de sensor a ser utilizado, o tipo de impactor, a precisão relacionada à aquisição de dados e o tratamento do mesmo, a distância entre o ponto de impacto e o transdutor (sensor), e o local de teste. Os resultados experimentais concordam com as previsões teóricas e revelam que este método é eficiente para análise de estrutura de concreto. A análise da espessura e resposta em frequência de um novo protótipo desenvolvido e os testes realizados possibilitou um erro médio de espessura real para amostras sem agregados de 0,39% e para as amostras com agregados com de 0,64%. Esses resultados apontam que o equipamento produzido tem potencial e que o mesmo pode ser utilizado para avaliação de estrutura de concreto.

Palavras-Chave: Ensaios não destrutivos. Teste eco-impacto. Sensores. Medições de Espessuras.

ABSTRACT

MANUEL, Regildo Batista do Sacramento. *Estimation of the thickness of the concrete using the method of impact-echo*. 2014. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2014.

In this research we used an experimental device that uses the method of impact-echo on Physical Testing Laboratory of the Polytechnic Institute of Rio de Janeiro (UERJ/IPRJ), to estimate the thickness of concrete slabs through the propagation of stress waves generated by an impact. To determine this thickness, several mechanisms for structuring the prototype equipment in order to obtain the best possible reading by means of existing literatures were investigated. Among the parameters evaluated in the study was the model of sensor being used, the type of impact, the precision related to the data acquisition and processing thereof, the distance between the impact point and the transducer (sensor), and test site. The experimental results agree with the theoretical predictions and show that this method is effective for analyzing concrete structure. The thickness analysis and frequency response of a new prototype and testing allowed an average error of actual thickness for samples without aggregates and 0.39 % for samples with aggregates with 0.64 %. These results indicate that the product produced has potential and that it can be used for evaluation of concrete structure.

Keywords: Non-destructive testing. Test impact-echo. Sensors. Thickness measurements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Simulação de elementos finitos de um impacto em uma placa	22
Figura 2 - A posição relativa de diferentes tipos de ondas criadas por um impacto	23
Figura 3 - Comportamento de um incidente da onda P numa interface entre dois meios diferentes	25
Figura 4 - Diagrama simplificado do método eco-impacto.....	29
Figura 5 - Princípio da análise de frequência	29
Figura 6 - Exemplos de espectros de amplitude dos testes de eco-impacto.....	32
Figura 7 - Os principais componentes do método de eco-impacto.....	33
Figura 8 - Função força-tempo de um impacto em um sólido	34
Figura 9 - Exemplo de análise de frequência usando Transformada de Fourier	36
Figura 10 - Os primeiros 4 modos correspondem ao espectro de amplitude experimental para sólido de 0.3 m.	38
Figura 11 - Dois procedimentos para a medição da espessura de placas de concreto de acordo com ACTM C 1383-98	39
Figura 12 - Ilustração de sensores utilizados nos experimentos.....	42
Figura 13 - Esquema de condicionamento de sinais na ligação dos sensores.....	43
Figura 14 - Configuração de um Arduino	45
Figura 15 - Componentes do diagrama de blocos LabVIEW	47
Figura 16 - Ilustração do osciloscópio da Tektronix TDS 1012 B utilizado no experimento .	48
Figura 17 –Ilustração de plataforma de OriginPro 8.5	49
Figura 18 - Protótipo do Eco-impacto utilizado no processo experimental.....	50
Figura 19 - Concretagem das amostras.....	51
Figura 20 - Impactor utilizado no experimento	54
Figura 21 - Teste para obtenção de velocidade com sistema de Eco-Impacto.....	56
Figura 22 - Teste para obtenção da frequência dominante com eco- impacto.....	57

Figura 23 - Gráfico obtido das ondas com Eco-Impacto para obtenção velocidade a partir da variação do tempo da amostra Corpo1 (X).	58
Figura 24 - Gráfico obtido das ondas com Eco-Impacto para obtenção velocidade a partir da variação do tempo da amostra Corpo 1 (X) ampliado	58
Figura 25 - Gráfico obtido do eco-impacto da amostra Corpo1 (X) com forme a norma ASTM C 1383 do procedimento B	59
Figura 26 - Espectro obtido do gráfico da Figura 25 depois de Transformada Rápida de Fourier para ondas no domínio da frequência.	60
Figura 27 - Gráfico obtido das ondas com Eco-Impacto para obtenção velocidade a partir da variação do tempo da amostra Corpo1 (+).....	61
Figura 28 - Obtenção de velocidade a partir da variação do tempo de propagação de ondas de amostra Corpo1 (+).....	62
Figura 29 - Gráfico no domínio do tempo obtido do eco-impacto da amostra Corpo1 (+) com forme a norma ASTM C 1383 do procedimento B	63
Figura 30 - Espectro obtido depois da transformação das ondas para domínio da frequência	64
Figura 31 - Gráfico para obtenção de velocidade da onda de amostra Corpo2 (X)	65
Figura 32 - Obtenção de velocidade a partir da variação do tempo de propagação de ondas de amostra Corpo2 (X)	66
Figura 33 - Gráfico no domínio do tempo obtido do eco-impacto da amostra Corpo2 (X) com forme a norma ASTM C 1383 do procedimento B	67
Figura 34 - Espectro obtido depois da transformação das ondas para domínio da frequência	68
Figura 35 - Gráfico para obtenção de velocidade da onda de amostra Corpo2 (+).....	69
Figura 36 - Obtenção de velocidade a partir da variação do tempo de propagação de ondas de amostra Corpo2 (+).....	69
Figura 37 - Gráfico no domínio do tempo obtido do eco-impacto da amostra Corpo2 (+) com forme a norma ASTM C 1383 do procedimento B	71
Figura 38 - Espectro no domínio da frequência, obtido do eco-impacto da amostra Corpo2 (+) com forme a norma ASTM C 1383 do procedimento B.....	71
Figura 39 - Gráfico para obtenção de velocidade da onda de amostra Corpo3 (X)	73

Figura 40 - Obtenção de velocidade a partir da variação do tempo de propagação de ondas de amostra Corpo3 (X)	73
Figura 41 - Espectro no domínio do tempo, amostra Corpo 3 (X)	74
Figura 42 - Espetro no domínio de frequência, amostra Corpo 3 (X)	75
Figura 43 - Gráfico para obtenção de velocidade da onda de amostra Corpo 4 (X)	76
Figura 44 - Espectro no domínio de tempo (a), e no domínio de frequência (b) da amostra Corpo 4 (X)	77
Figura 45 - Gráfico para obtenção de velocidade da onda de amostra Corpo 4 (+)	78
Figura 46 - Espectro no domínio de tempo (a), e no domínio de frequência (b) da amostra Corpo 4 (X)	79
Figura 47 - Gráfico para obtenção de velocidade de propagação da onda de amostra Corpo 5 (X)	80
Figura 48 - Espectro no domínio de tempo (a), e no domínio de frequência (b) da amostra Corpo 5 (X)	81
Figura 49 - Gráfico para obtenção de velocidade de propagação da onda de amostra Corpo 6 (X)	83
Figura 50 - Espectro no domínio de tempo (a), e no domínio de frequência (b) da amostra Corpo 6 (X)	84
Figura 51 - Gráfico para obtenção de velocidade de propagação da onda de amostra Corpo 6 (+)	85
Figura 52 - Espectro no domínio de tempo (a), e no domínio de frequência (b) da amostra Corpo 6 (+)	86
Figura 53 - Gráfico obtido através da amostra Corpo 1 (X) para obtenção velocidade da onda	97
Figura 54 - Gráfico obtido do teste do eco-impacto por meio da amostra Corpo 1 (X)	98
Figura 55 - Gráfico obtido do teste do eco-impacto por meio da amostra Corpo 1 (+)	99
Figura 56 - Gráfico obtido do teste do eco-impacto por meio da amostra Corpo 1 (+)	100
Figura 57 –Gráfico obtido do teste do eco-impacto por meio da amostra Corpo 2 (X)	101

Figura 58 - Gráfico obtido do teste do eco-impacto por meio da amostra Corpo 2 (X).....	102
Figura 59- Gráfico obtido do teste do eco-impacto por meio da amostra Corpo 2 (+)	103
Figura 60- Gráfico obtido para estimativa da velocidade da amostra Corpo 2 (+)	104
Figura 61- Gráfico para obtenção de velocidade de onda da amostra Corpo 4 (X)	105
Figura 62 - Gráfico para obtenção de velocidade de onda da amostra Corpo 4 (X)	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Impedância acústica específica.....	26
Tabela 2 - A relação entre o diâmetro, a frequência máxima útil, e espessura mensurável...	35
Tabela 3 - Descrição das amostras	51
Tabela 4 - Leitura do eco-impacto obtida da amostra Corpo 1 (X)	59
Tabela 5 - Leitura do eco-impacto obtida da amostra Corpo 1 (+).....	62
Tabela 6 - Leitura do eco-impacto obtida da amostra Corpo 2 (X).	66
Tabela 7 - Leitura do eco-impacto obtida da amostra Corpo 2 (+).....	70
Tabela 8 - Leitura da velocidade obtida da amostra Corpo 3 (X).....	74
Tabela 9 - Leitura da velocidade obtida da amostra Corpo 4 (X).....	76
Tabela 10 - Leitura da velocidade obtida da amostra Corpo 4 (+)	78
Tabela 11 - Leitura da velocidade de propagação de onda obtida da amostra Corpo 5 (X).....	81
Tabela 12 - Leitura da velocidade de propagação de onda obtida da amostra Corpo 6 (X).....	83
Tabela 13 - Leitura da velocidade de propagação de onda obtida da amostra Corpo 6 (+)	85
Tabela 14 - Comparação da velocidade de propagação entre as amostras com agregados (+) e sem agregados (X)	87
Tabela 15 - Comparação da frequência dominante entre as amostras com agregados (+) e sem agregados (X)	88
Tabela 16 - Cálculo da velocidade da onda utilizando procedimento A e B em amostras sem agregados.....	89
Tabela 17 - Cálculo da velocidade da onda utilizando procedimento A e B em amostras com agregados.....	89
Tabela 18- Relação das análises das amostras sem agregados	90
Tabela 19 - Relação das análises das amostras com agregados.....	90
Tabela 20 - Especificação do sensor utilizado no experimento.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials.
Eq.	Equação.
FFT	Fast Fourier Transform
GPR	Radar de penetração no solo.
Hz	Hertz (unidade de frequência).
IMPACT-ECHO	Eco-Impacto
KHz	Quilohertz (unidade de frequência).
NBR	Norma Brasileira
NBS	National Bureau of Standards
NIST	National Institute of Standards and Technology
USB	Universal Serial Bus.

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Velocidade da onda.
C_p	Velocidade da onda P.
C_s	Velocidade da onda S.
C_r	Velocidade da onda R.
E	Modulo de elasticidade de Young.
N	Coefficiente de Poisson dinâmico.
D	Diâmetro da esfera de aço.
P	Densidade do material.
G	Modulo de elasticidade de cisalhamento.
R	Coefficiente de reflexão.
Z_1	Impedância especifica do material 1.
Z_2	Impedância especifica do material 2.
Λ	Comprimento de onda.
F	Frequência.
f_{\max}	Frequência máxima de energia útil.
Δt	Variação do tempo decorrido.
T	Profundidade da interface refletida.
B	Fator determinado conforme a geometria da placa.
L	Distancia entre transdutores.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	17
1	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	20
1.1	Conceito histórico	20
1.1.1	<u>Tipos de onda</u>	21
1.1.2	<u>Velocidade da onda</u>	24
1.1.3	<u>Reflexão das ondas</u>	24
1.1.4	<u>Eco-impacto</u>	27
1.1.4.1	Desenvolvimento do método.....	27
1.1.4.2	Princípio do método.....	28
1.1.4.3	Análise de frequência.....	29
1.1.4.4	Instrumentação.....	33
1.1.4.5	Relação de função força-tempo do impacto.....	33
1.1.4.6	Aplicação.....	37
1.1.4.7	Benefício de aplicação do método eco-impacto.....	39
2	METODOLOGIA	40
2.1	Variáveis de interesse	40
2.1.1	<u>Montagem experimental</u>	41
2.1.1.1	Sensores piezoelétrico.....	41
2.1.1.2	Amplificador de sinais.....	43
2.1.1.3	Aquisição de dados.....	44
2.1.1.4	Arduino.....	45
2.1.1.5	LabVIEW.....	46
2.1.1.6	Osciloscópio.....	47
2.1.1.7	Tratamento de sinal.....	48
2.1.2	<u>Equipamento utilizado no ensaio</u>	50
2.1.3	<u>Ensaio e procedimento experimental</u>	50
2.1.3.1	Procedimento de análise.....	53
3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	55
3.1	Amostra corpo1 (X)	57
3.2	Amostra Corpo1 (+)	61
3.3	Amostra Corpo2 (X)	65

3.4	Amostra Corpo2 (+)	68
3.5	Amostra Corpo3(X)	72
3.6	Amostra Corpo4 (X)	75
3.7	Amostra Corpo 4 (+)	77
3.8	Amostra Corpo 5 (X)	80
3.9	Amostra Corpo 6 (X)	82
3.10	Amostra Corpo 6 (+)	84
3.11	Comparação de análises dos resultados obtidos	86
3.11.1	<u>Comparando as velocidades de propagação de onda</u>	86
3.11.2	<u>Comparação entre frequência dominante</u>	87
3.11.3	<u>Confronto da velocidade obtida pelo Procedimento A e B da norma ASTM C 1383-98</u>	88
3.12	Validação do equipamento e melhorias	91
	CONCLUSÃO	92
	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICE – Informações complementares de algumas amostras	97

INTRODUÇÃO

MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA

Segundo os autores Nascimento, (2011); Pessôa, (2011); Pettres,(2012); Ramono, (2004); Lacerda, (2012); o concreto é um material de construção heterogêneo resultante da mistura de um aglomerante com materiais inertes e água. Atualmente é o material mais usado na construção de estruturas de edificações e grandes obras viárias como pontes, viadutos, passarelas, etc. Seu emprego é conhecido em todo o mundo. Seu uso é difundido pela facilidade de execução e adaptação as mais diferentes formas.

A garantia de qualidade e segurança exige cada vez mais cuidados, nas confecções de estruturas de concreto. Um bom conhecimento das propriedades do material, dos fundamentos de projeto, das normas nacionais e internacionais e da tecnologia da execução é necessário e indispensável para obter estruturas de concreto seguras e duráveis (HELENE, 1989).

Ao longo dos anos, diversos métodos foram desenvolvidos tornando necessário o uso de técnicas avançadas de matemática e computação para resolver problemas mais complexos. Apesar disso, a maioria das regras de dimensionamento nas especificações estrutural de concreto é realizada pelo ensaio de compressão, sendo por isso natural que esta propriedade seja considerada da maior importância. No entanto, este por sua vez é um processo demorado com um custo relativamente alto.

A evolução dos processos construtivos, associado à necessidade de rapidez para acompanhar essa demanda na execução de obras pode vir a ter benefícios como malefícios às estruturas de concreto. Os benefícios estão associados às grandes obras conhecidas pelo mundo a fora, executada em curto espaço de tempo e com menor consumo de concreto, tornando assim o projeto mais econômico. Por outro lado, existem ocasiões que podem trazer malefícios, podendo surgir manifestações inadequadas durante os processos construtivos.

A necessidade de testes *in situ*, a demanda por ensaios mais rápidos e mais baratos, que quando examinado não causa defeitos as estrutura do concreto, leva ao desenvolvimento de outros ensaios além do tradicional ensaio de compressão. As técnicas dos ensaios não destrutivos preenche esse requisito uma vez que esses métodos não geram nenhum tipo de dano na estrutura analisada.

Ultimamente, vários métodos não destrutivos têm sido desenvolvidos com a finalidade de analisar estruturas de concreto de forma a amenizar ou até mesmo resolver os problemas acima descritos. O Radar de penetração no solo (GPR), a Tomografia de raio X, o Ultrassom e o método do eco-impacto são alguns desses métodos não destrutivos. Ensaios não destrutivos, ou ENDs, tem por objetivo inspecionar se um determinado equipamento ou estrutura apresenta alguma descontinuidade ou defeito sem, entretanto, comprometer a integridade do material inspecionado. O seu caráter preventivo, previne acidentes e reduz o custo tanto com a segurança quanto a uma parada do funcionamento inesperado do material.

Tocar um objeto e ouvir o som resultante é uma das mais antigas formas de teste não destrutivo (NDT), com base na onda de tensão de propagação. Este é essencialmente um tipo de teste de ressonância onde o impacto inicial leva a vibrações ressonantes em frequências diferentes dentro da faixa audível (20 Hz a 20 kHz). Variações nestas frequências são indicadores de diferenças na estrutura perto do local de impacto. Este método foi padronizado pela ASTM como prática D4580 para localizar corrosão induzida em delaminação em tabuleiros de pontes de concreto (CARINO, 2013). O método do eco-impacto se baseia em ondas de tensão de baixa frequência geradas por um impacto elástico que se propaga através da estrutura, e são refletidas por falhas internas e superfícies externas.

Segundo Sansalone (1997), este método pode ser aplicado em várias estruturas de concreto, tais como pavimentos, paredes de retenção, represas, colunas vigas, placas com finalidade de determinar falhas internas, tais como fissuras, delaminações, espaços vazios, favo de mel, a espessura de uma secção do concreto.

A utilização de (ENDs), não substitui os ensaios à compressão, mas passa a ser um estudo alternativo, em conjunto, com outros métodos para uma melhor confiabilidade e segurança da vida útil da estrutura.

Objetivo geral

Aplicando as técnicas e metodologias adequadas da leitura, pretende-se com este trabalho estimar a espessura de diferentes estruturas de concreto por meio de ensaio não destrutivo do eco-impacto com um sistema baseado em componentes de baixo custo e com um correto dimensionamento. Este objetivo implicará certamente em um compromisso entre o preço e qualidade do material eletrônico assim como um cuidado adicional em qual circunstância da

execução de *software* para que sejam contempladas estas características (ou falta delas) nos algoritmos a desenvolver neste trabalho.

Objetivos específicos

- Estimar espessura do concreto através do ensaio de eco-impacto por meio do equipamento produzido em laboratório;
- Avaliar alguns parâmetros que influenciam nos resultados;
- Interpretação dos resultados através das técnicas do eco-impacto;
- Correlacionar os resultados obtidos com os resultados estudados por outros autores (revisão de literatura),
- Avaliar a precisão dos resultados obtidos pelo “*software*” de forma a validá-los.

Organização do trabalho

Para que alcançássemos os objetivos propostos através das informações pesquisadas, referências e resultados, o presente trabalho se divide em 4 capítulos.

No capítulo 1 trata da introdução, esclarecendo os objetivos que se pretende atingir, bem como a importância do tema.

No capítulo 2 é apresentada uma breve introdução bibliográfica sobre ensaios não destrutivos, sobre tudo, o método do eco-impacto.

Por ser este um trabalho maioritariamente experimental, uma grande parte do seu conteúdo corresponde à descrição dos ensaios realizados, que serão apresentados no capítulo 3:

- ✓ Montagem experimental: demonstrações e dossiês das condições dos ensaios;
- ✓ Aquisição de dados: análise sobre o método usado;
- ✓ Tratamento de dados: discussão e avaliação sobre os resultados obtidos;

No capítulo 4 finalmente, são apresentados a conclusão e as considerações finais, seguido de sugestões para futuras pesquisas.

1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

1.1 Conceito histórico

O tradicional, e ainda mais amplamente utilizado, método de ensaio para análise de estrutura de concreto é a retirada de uma pequena parte de amostras a partir do próprio concreto para uma inspeção visual. Embora este método seja altamente confiável, ele também é demorado e caro, e os defeitos que causados por este método, muitas vezes se tornam pontos focais para a possível deterioração (SANSALONE; STREETT, 1998).

De acordo com a história, desde que o concreto começou a ser agregado como material estrutural houve a necessidade de caracterizar ou avaliar sua integridade e medir outras propriedades físicas importantes como estimar sua resistência “in-loco” e, como consequência, frequentes foram e têm sido as tentativas em se desenvolver ou aprimorar os métodos de ensaios não destrutivos (AKTS, 2007).

Essas preocupações consistem em adaptar as técnicas de projeto e execução da construção da estrutura de concreto de forma a que se possam atender os requisitos de desempenho cada vez mais altos e garantir uma vida útil satisfatória, devendo as estruturas de concreto ser projetadas e construídas de modo a conservar a segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente a sua vida útil (IRRIGARAY, 2012).

Uma característica importante desses ensaios é a possibilidade de execução de vários ensaios no mesmo local, ou em locais muito próximos, de modo que se podem acompanhar as variações ocorridas no concreto ao longo do tempo. A utilização desse tipo de material é de fundamental importância já que a urbanização das grandes cidades está cada vez mais sendo difundida, onde edifícios e fábricas de grande porte ganham destaque. Em meio a este espaço de intensa construção, é necessário o aumento das técnicas e tecnologias para elevação desses objetos arquitetônicos, para garantir a segurança e seu tempo de vida. Segundo Akts, (2007) em uma estrutura de concreto simples, a espessura é o principal fator que afeta o seu desempenho. Por isso, muitas vezes a determinação da espessura é necessário para concreto recém-construído e para já existente.

O uso do ENDs pode prover preciosa informação da condição de uma estrutura de concreto e pode ser uma valiosa ajuda ao planejar a manutenção de uma estrutura. O END pode ser usado durante a fase de construção para garantia de qualidade de estrutura de uma

construção. Inspeções especiais que combinam uma pesquisa visual com técnicas de END podem descobrir problemas em um estado embrionário e podem fornecer valiosa informação da condição atual da estrutura.

Segundo Andrade, (2007) ensaios não destrutivos podem ser aplicados em estruturas recentes ou antigas. Sendo que, estruturas recentes, as aplicações principais serão provavelmente para controle de qualidade ou até mesmo para esclarecer dúvidas acerca da qualidade dos materiais ou da construção. Em estruturas antigas surgem geralmente associados com acesso à integridade da estrutura ou sua adequação. Como uma alternativa ao método tradicional de perfuração, vários testes não destrutivos foram desenvolvidos para a avaliação de estrutura de concreto e outros materiais estruturais. Cada método tem a sua própria área de aplicação e vantagens.

O método de propagação de ondas eletromagnéticas; Técnicas termográficas infravermelhas; Método de velocidade de pulso ultrassônico; Eco Pulso (ultrassônico); Eco-Impacto são alguns desses métodos. Segundo Malhotra e Carino, (2003) o método do eco pulso ultrassônico e método do eco-impacto assemelham-se pelas características comuns sobre as condições internas das estruturas de concreto como: as técnicas de processamento de sinais que são usados, configuração do ensaio, instrumentação, as características da resposta medida, são feitos com base na propagação das ondas de tensão na estrutura de concreto.

A aplicação de métodos acústicos modernos para ensaios não destrutivos requer uma compreensão e conhecimento dos tipos de onda e as suas distinções.

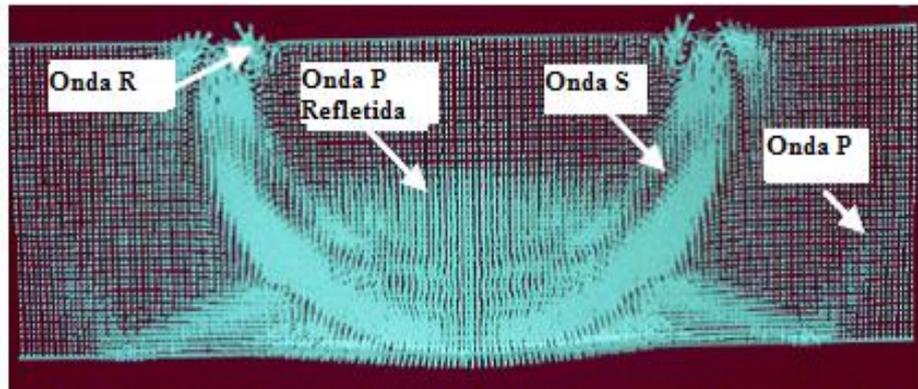
1.1.1 Tipos de onda

Quando uma perturbação (tensão ou deslocamento) é aplicada de repente em um ponto sobre a superfície de um sólido, tal como um impacto, a perturbação se propaga através do sólido em três diferentes tipos de ondas de tensão. Cada uma das ondas ocasiona um movimento específico das partículas no meio de transmissão, neste caso no concreto. São conhecidas como, a onda P que são carregadas de tensões normais (ondas de compressão/tração), ondas S carregadas de tensões de cisalhamento (onda de distorção ou transversal) e a onda Rayleigh ou onda R, chamada também de ondas de superfícies (CARINO, 2001).

As ondas de compressão geralmente são duas vezes mais rápidas que as ondas de distorção e a de Rayleigh e têm a movimentação das partículas na mesma direção em que as ondas se propagam. As ondas transversais ou de cisalhamento têm as partículas se movimentando perpendicularmente na direção do percurso da onda. As ondas de superfície ou Rayleigh têm as partículas movimentando ao longo da superfície em uma trajetória elíptica.

Na Figura 1, é mostrado um resultado de uma análise de elemento finito de uma placa que sofreu o impacto. A figura é um gráfico dos deslocamentos nodais da malha de elementos finitos. No momento em que a onda S está chegando ao fundo da placa a reflexão da onda P está aproximando do do percurso, próximo da parte de cima da placa (CARINO, 2001).

Figura 1 - Simulação de elementos finitos de um impacto em uma placa



Nota: Propagação de ondas em estrutura de concreto quando produz um impacto.
 Fonte: SANSALONE e CARINO, 1986 apud CARINA, 2001.

Estes diferentes tipos de ondas representados na Figura 1, estão correlacionados uns com os outros pelas propriedades mecânicas do material em estudo, como mostrado por (CARINO, 2001).

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

onde:

C_p = velocidade da onda P;

E = módulo de elasticidade de Young;

ν = coeficiente de Poisson dinâmico;

ρ = densidade.

A onda S propaga a uma velocidade mais lenta, C_s , do que a onda P e é dada por:

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad \text{onde,} \quad G = \frac{E}{2(1-\nu)} \quad (2)$$

em que, G é o módulo de elasticidade de cisalhamento.

Um parâmetro útil é a relação, α , da velocidade da onda S para onda P ou seja:

$$\alpha = \frac{C_s}{C_p} = \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}} \quad (3)$$

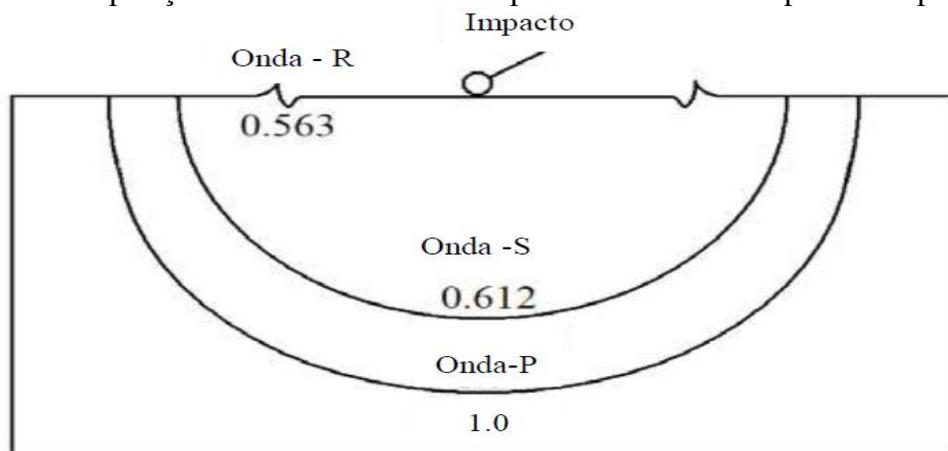
Para um coeficiente de Poisson de 0,2, típico de um concreto endurecido, o valor α nesta relação é de 0,61.

E a relação entre a velocidade da onda R e a velocidade da onda S, é dada por (CARINO, 2001):

$$C_r = \frac{0.87+1.12\nu}{1+\nu} C_s \quad (4)$$

Para um coeficiente de Poisson de 0,2, a velocidade da onda R é 92% da velocidade de onda S, ou seja, 56% da velocidade da onda P como podemos ver na Figura 2. Os números indicam os valores relativos normalizados de acordo com a velocidade da onda P.

Figura 2 - A posição relativa de diferentes tipos de ondas criadas por um impacto



Fonte: SANSALONE e CARINO, 1986 apud CARINO, 2001.

1.1.2 Velocidade da onda

Medição da velocidade de ondas de tensão em uma estrutura de concreto proporciona informação valiosa sobre o estado do material. Dependendo da mistura bem como dos componentes do concreto, a velocidade de uma onda não dependerá apenas do tipo de onda, como também das propriedades intrínsecas do concreto. A velocidade da onda é afetada por vários fatores, incluindo a localização de ensaio e do grau de hidratação nesse ponto. O valor médio normal da onda P para um concreto com 28 dias de idades, estaria nas faixas de 3000 – 4500 m/s (AKTS, 2007). Os valores abaixo dessa faixa indicam concreto de má qualidade, considerando que acima desses valores indicam de boa qualidade. A não homogeneidade do material tem uma variação quando fazemos medições através da espessura. Segundo Popovics, (1998) apud Akts, (2007) a velocidade da onda calculada ao longo da superfície através da espessura não é sempre a mesma e esta mudança não é proporcional ou consistente e, por outro lado, não podem ser previstas. No entanto, o acúmulo das partículas de agregados no fundo do elemento estrutural aumenta as velocidades da onda correspondente.

Embora este efeito pode não ser perceptível para pavimentos de concreto, uma vez que a espessura normalmente não é grande, ele pode alterar os resultados, especialmente para colunas e vigas.

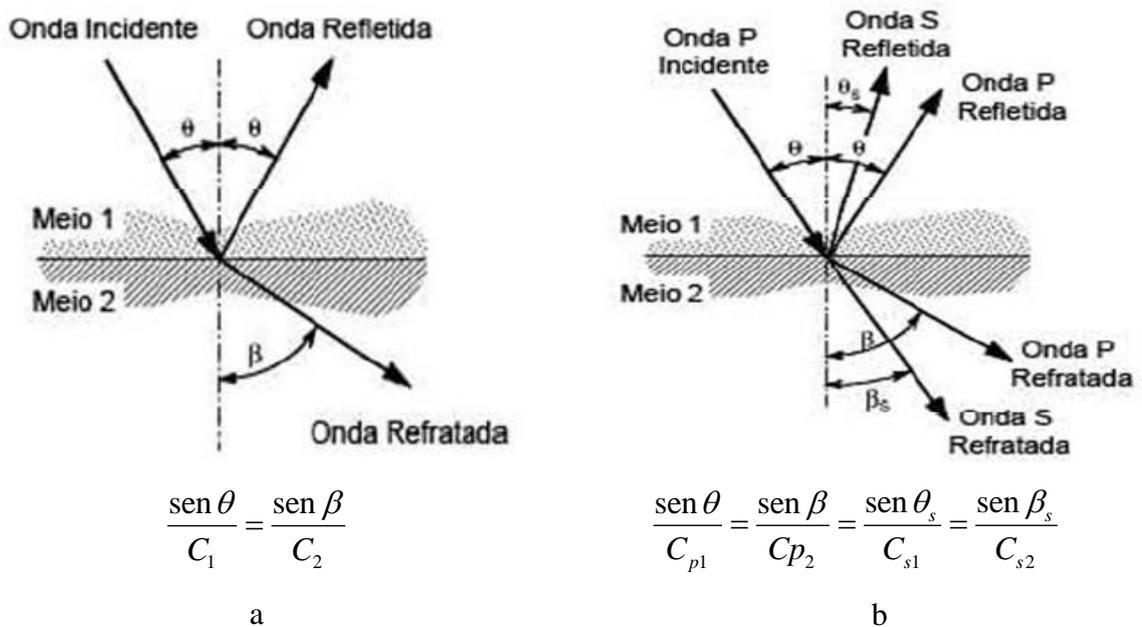
1.1.3 Reflexão das ondas

Uma onda de tensão ao percorrer certo material e encontra uma interface entre dois meios, cujas propriedades são diferentes, uma porção dessa onda é refletida. A geometria da reflexão e absorção está relacionada com o ângulo de incidência. Em uma fronteira entre dois meios diferentes apenas uma parte da onda de tensão é refletida. O restante penetra no meio subjacente (refração da onda). Esse ângulo de refração, β , é uma função do ângulo de incidência, θ , e da razão das velocidades de onda, C_2/C_1 , nos diferentes meios da interface, e este pode ser calculado pela lei de Snell (BUNGEY *et al.*, 2006):

$$\text{sen } \beta = \frac{C_2}{C_1} \text{sen } \theta \quad (5)$$

De acordo com Carino, (2004) *apud* Andrade, (2007), quando, uma perturbação provoca um ângulo oblíquo, ondas de tensão distintas podem alterar o modo de propagação das ondas. Dependendo do ângulo de incidência, a onda P pode ser refletida parcialmente. Uma vez que, a onda S se propaga a uma velocidade mais baixa que a onda P, logo, refletirá e refratará ângulos θ_s e β_s (determinados usando lei Snell), menores que os ângulos de reflexão e refração da onda P, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Comportamento de um incidente da onda P numa interface entre dois meios diferentes



Nota: Incidências da onda P ente dois meios, Reflexão e Refração (a) e Modo de conversão (b).
 Fonte: CARINO, 2004.

Quando uma onda de tensão viaja através do material e incide sobre a interface, uma onda incidente é refletida. A amplitude da reflexão é uma função do ângulo de incidência e é um máximo, quando este ângulo é de 90° (incidência normal). Por incidência normal do coeficiente de reflexão, R , é dado por (KRAUTKRAMER, 1990 *apud* CARINO, 2013):

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (6)$$

onde:

Z_2 = impedância acústica específica do material 2;

Z_1 = impedância acústica específica do material 1.

A impedância acústica específica é o produto da velocidade de onda e da densidade do material (SANSALONE & CARINO, 1991 *apud* CARINO, 2001):

$$C \cdot \rho = Z \quad (7)$$

Na Tabela 1, são apresentados valores aproximados Z para alguns materiais.

Tabela 1 - Impedância acústica específica

Material	Impedância acústica específica (kg/m²s)
Ar	0.4
Água	0.5 x 10 ⁶
Solo	0.3 – 4 x10 ⁶
Concreto	7 – 10 x 10 ⁶
Aço	47 x 10 ⁶

Nota: Impedância acústica específica de alguns materiais

Fonte: CARINO, 2001.

Ao vermos os valores apresentados na Tabela 1, podemos perceber que, quando uma onda viaja pela estrutura de concreto e encontra uma interface concreto-ar, quase todas as ondas de tensão refletirão de volta. Na verdade, essa é a coerência por trás de métodos de testes não destrutivos utilizando a tensão de propagação de ondas. Tais técnicas têm sido bem sucedidas na localização de defeitos em sólidos, utilizando a diferença entre a impedância acústica específica de meios diferentes.

Para melhor entendimento deste trabalho, mostraremos aqui como são feitas as medições através do método não destrutivo eco-impacto e enfatizando a leitura eco pulso (ultrassônico), no Apêndice A pela semelhança da sua análise de leitura.

1.1.4 Eco-impacto

É um método de ensaio não destrutivo para estruturas de concreto e alvenaria, baseado no uso de ondas de tensão geradas por um impacto elástico. É dos métodos acústicos mais aplicados para determinar a geometria de uma estrutura de concreto. A sua aplicação, tem mostrado ser um método viável para a localização de uma variedade de defeitos em estruturas de concreto.

O desenvolvimento do método de eco-impacto superou as dificuldades encontradas no método de eco pulso. Pois, a velocidade do impacto é fundamental para criar uma frequência de onda correta para detecção das falhas, a qual é tipicamente menor que 80 kHz (SANSALONE; STREETT, 1998).

1.1.4.1 Desenvolvimento do método

O sucesso é, em parte, devido ao resultado de sua base científica fundamentada e procedida de um longo período de investigação com a teoria combinada com simulação numérica, à verificação experimental e demonstrações de campo (SANSALONE; STREETT, 1998; CARINO, 2001). Pesquisa realizada na década de 1940 a 1960 forneceu bases técnicas para normas sobre métodos ENDS clássicos agregados a rotina para fins industriais como, radiografia de raios X, ultrassom, métodos de correntes de Foucault, e os métodos magnéticos. No entanto, poucos trabalhos tinham sido realizados sobre métodos ENDS para estrutura de concreto, até que duas grandes falhas de construção foram investigadas pela National Bureau of Standards (NBS), no final de 1970 (CARINO *et al*, 1983 e LEW, 1980 *apud* CARINO, 2001).

Verificaram em ambos os casos que o concreto no local foi identificado como o fator que tinha contribuído para os acidentes. Com isso, a National Bureau of Standards (NBS), empreendeu um programa de pesquisa de longo prazo para fornecer a base técnica para métodos de ensaio para avaliar as características de concreto no local. Em 1983, a NBS buscava um método para detecção de defeitos internos com base na revisão dos outros métodos já existente, optando de forma inusitada por um método baseado em ondas de tensão, uma vez que a propagação de onda em um determinado sólido é afetada diretamente pelas

propriedades mecânicas (SASALONE e CARINO, 1984 apud CARINO, 2001). Como resultado, a pesquisa desenvolvida ficou-se conhecida como método de eco-impacto. A partir de 1987, a pesquisa passou para Universidade de Cornell, sob a direção da professora Mary Sansalone que tinha participado do trabalho pioneiro na NBS como estudante de Doutorado (CARINO, 2001). O estudo em Cornell resultou no desenvolvimento do primeiro instrumento de campo patenteado (PRATT e SANSALONE, 1992 apud CARINO, 2001).

O sucesso do método forneceu informações, a partir de umas séries de fatores como: equipe de pesquisadores com diferentes características capazes de contribuições importantes; a disponibilidade de ferramentas de modelação permitiu que os investigadores simulassem uma gama de situações de propagação de ondas; desenvolvimento de novos transdutores com finalidades variadas que acabaram resultando na evolução de processamento de sinais com fins de análise de frequências (PESSIKI e CARINO, 1988 apud CARINO, 2001)

As primeiras aplicações de métodos de impacto aconteceram em geotécnica quando buscava avaliar a integridade de fundações em estrutura de concreto. A técnica foi conhecida como o método eco sônica ou sísmico eco (ACI 208.2R). Os comprimentos destas estruturas de fundação permitiram separar a geração do impacto e a chegada do eco, e a determinação dos tempos de viagem (CARINO, 2001).

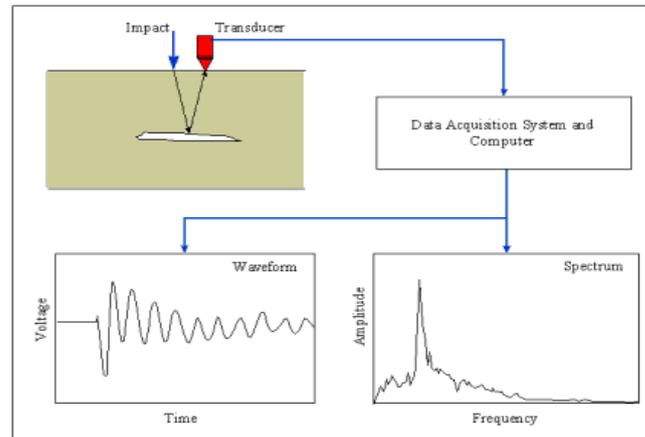
O método do eco-impacto pode ser usado para determinar a localização e a extensão das falhas, como fissuras, delaminações, vazios e descolamento na planície, reforços pós-tensionado de estruturas de concreto, incluindo placas (lajes, calçadas, paredes, pavimentos), placas de camadas (incluindo concreto com sobreposições de asfalto), colunas e vigas, medições de espessura de lajes de concreto com uma precisão melhor do que método do eco pulso (SANSALONE; STREETT, 1998).

1.1.4.2 Princípio do método

De acordo com a Figura 4 um impacto mecânico de curta duração produzido pela batida de uma pequena esfera de aço contra o concreto gerar ondas de tensão que se propagam na estrutura e são refletidas pelas falhas internas e nas superfícies externas. Deslocamentos de superfície provocados por reflexões destas ondas são captados por um transdutor-receptor,

situados adjacentes ao impacto e parcelas de amplitude em função da frequência (espectro) são obtidos (SANSALONE; STREETT, 1998).

Figura 4 - Diagrama simplificado do método eco-impacto

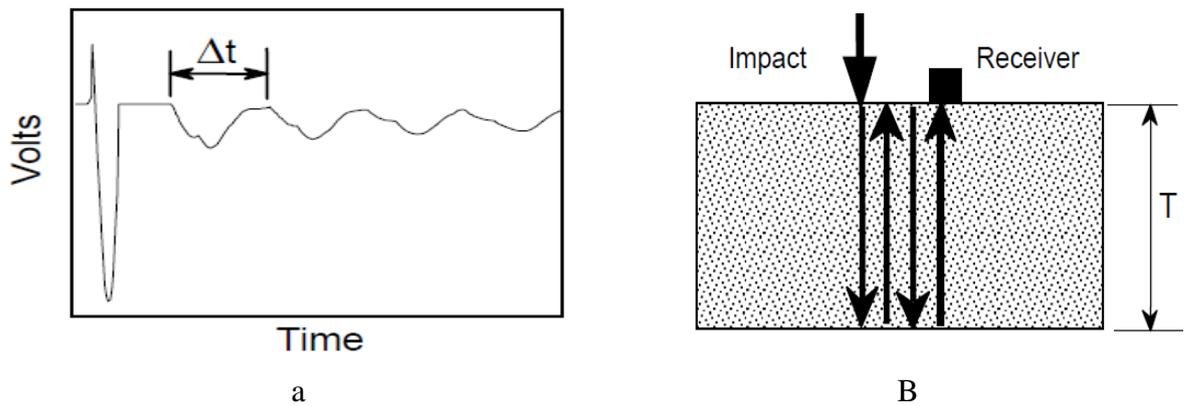


Nota: Diagrama simplificado do funcionamento de análise do eco-impacto.
 Fonte: SANSALONE; STREETT, 1998.

1.1.4.3 Análise de frequência

O princípio da análise de frequência é ilustrado na Figura 5. A onda P produzida pelo impacto sofre múltiplas reflexões entre a superfície de ensaio, e a interface refletida. Cada vez que a onda P chega à superfície de ensaio, provoca um deslocamento característico. Assim, a forma de onda tem um padrão periódico que depende da distância de viagem de ida e volta da onda P (CARINO, 2001). Um desenvolvimento fundamental que conduz para o sucesso do método de eco-impacto foi o uso de análise de frequência em vez de análise de domínio de tempo de formas de onda registada (CARINO *et al.*, 1986a *apud* CARINO, 2001).

Figura 5 - Princípio da análise de frequência



Fonte: CARINO, 2001.

Um elemento crucial do método acontece nesse ponto. Onde a Figura 5 tem um gráfico no domínio de tempo. Com toda análise feita, pelo método do eco-impacto é analisada sobre domínio de frequência (SANSALONE; STREETT, 1997).

Para a Figura 5a, temos que: $\Delta t = \frac{2T}{C_{pp}}$; análise no domínio de tempo.

Para a Figura 5b, temos que $f = \frac{1}{\Delta t}$; análise no domínio da frequência.

Assumindo que o transdutor de recepção está colocado próximo ao ponto de impacto, a distancia percorrida de ida e volta é $2T$, onde T é a distância entre a superfície de teste e de interface refletida. O intervalo de tempo entre as chegadas sucessivas de múltiplos da onda P refletida é a distância de viagem dividida pela velocidade da onda. A frequência, desta onda P refletida é encontrada tomando o inverso do intervalo de tempo e é determinado (CARINO, 2001).

$$f = \frac{C_{pp}}{2T} \quad (8)$$

onde:

C_{pp} = a velocidade da onda P através da espessura da secção da placa;

T = a profundidade da interface refletida.

Se o objeto que está sendo testado é uma placa sólida, então a frequência é calculada usando a Eq.(8). Esta equação é chamada a frequência da espessura da chapa e é a relação básica para interpretação dos resultados dos testes de eco impacto.

No estado embrionário da investigação que originou no desenvolvimento do método de eco-impacto, admitiu-se que a relação entre a velocidade da onda pela espessura da placa é

a mesma da velocidade da onda P em um grande sólido, como é dado na seção 1.1.1 pela Eq.(1) (SANSALONE e CARINO, 1986 apud CARINO, 2001). Estudos subsequentes revelaram que a velocidade da onda de uma seção de placa fora 96% da velocidade de um grande corpo sólido, isto é $C_{pp} = 0.96 C_p$, Eq.(9) (SANSALONE; STREETT, 1997 apud CARINO, 2001).

$$f = \frac{0.96C_p}{2T} \quad (9)$$

Para outro tipo de seção transversal, Lin e Sansalone (1992b, 1992c apud Andrade; 2007), sugeriram que a Eq.(9) deve ser generalizada na Eq.(10),

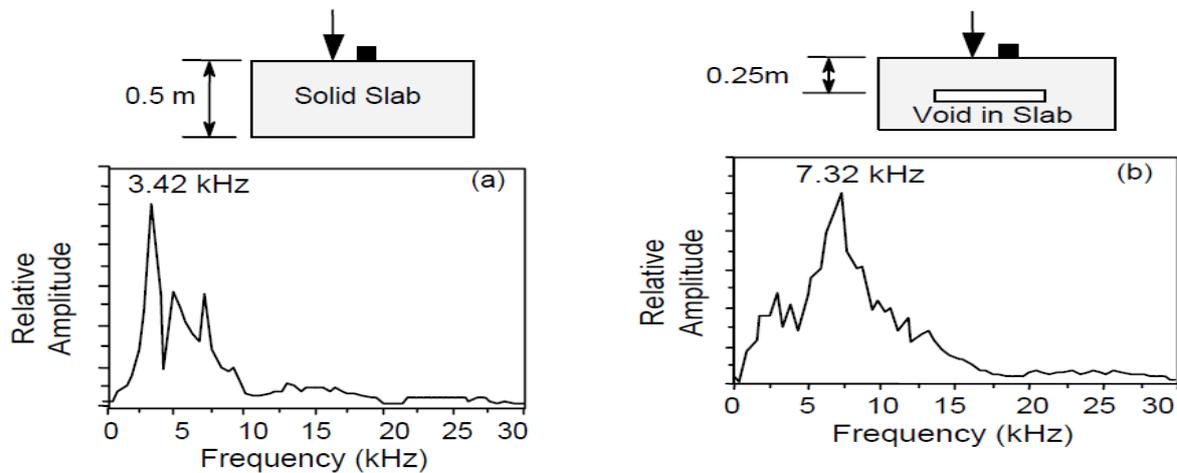
$$f = \frac{\beta C_{pp}}{2T} \quad (10)$$

Onde β é o fator determinado conforme a geometria da peça, um exemplo que podemos tomar é, para uma seção quadrada, o valor de β é de 0,87.

Segundo Sansalone; Streett, (1997), as análises dos resultados da frequência do método do eco-impacto é determinada tomando a frequência do pico dominante da forma de onda gravada. Isto é alcançado usando a técnica de Transformada de Fourier (TF) para transformar a forma de onda gravada para o domínio de frequência.

Esta técnica baseia-se no princípio da transformada de Fourier, que indica que qualquer forma de onda que pode ser representada como uma soma de curvas senoidais, cada uma com uma amplitude particular, a frequência e a mudança de fase (MALHOTRA; CARINO, 2003). A amplitude relativa das frequências de componente em forma de onda é obtida através dos cálculos de um espectro de amplitude da forma de onda por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). A Figura 6 mostra teste de eco-impacto em uma placa com um vazio, onde são obtidas as ondas de tensão que se propagam no objeto ao longo de frentes de onda esféricas e refletidas a partir dos defeitos internos. Os resultados de transformação estão representados como o espectro de amplitude, que mostra as amplitudes das várias frequências contidas no interior da forma de onda (SANSALONE, 1997 apud ANDRADE, 2007).

Figura 6 - Exemplos de espectros de amplitude dos testes de eco-impacto



Nota: Característica de teste de amplitude de eco-impacto: (a) teste de porção sólida de uma laje de espessura e 0,5 m, (b) teste sobre um vazio artificial aproximadamente 0,25 m de profundidade.

Fonte: CARINO, 2001.

Para estruturas da placa, a frequência de espessura será normalmente o único pico dominante no espectro. O valor da frequência de pico no espectro de amplitude pode ser usado para determinar a profundidade como expressa Eq.(11) (CARINO, 2001).

$$T = \frac{C_{pp}}{2f} \quad (11)$$

A Figura 6 ilustra a utilização de testes de análise de eco-impacto no domínio da frequência. A Figura 6(a), mostra o espectro de amplitude de um teste sobre uma porção sólida de uma de espessura da laje de concreto de 0,5 m. Há um pico de frequência em 3,42 kHz, o que corresponde a múltiplas reflexões de ondas P entre as superfícies inferior e superior da laje. A Figura(b), mostra o espectro de amplitude de um teste através de uma porção da placa que contém um espaço vazio em forma de disco (SANSALONE, CARINO,1986; CARINO e SANSALONE, 1990 *apud* CARINO, 2001).

O pico dominante em 7,32 kHz resultado de múltiplas reflexões entre o topo da laje até a profundidade nula (vazio). Usando Eq.(11), a profundidade calculada do vazio é $3420 / (2 \times 7,320) = 0,23$ m, o que se compara favoravelmente com a distância conhecida de 0,25 m.

A dedução dos cálculos acima, também é útil a fim de observar o efeito da espessura em valores de frequência. O valor do pico de frequência dominante aumenta à medida que diminui a distância percorrida.

1.1.4.4 Instrumentação

A instrumentação de teste do eco-impacto na Figura 7 se constitui fundamentalmente de três componentes básicos:

- Um pêndulo mecânico capaz de produzir impactos de curta duração, sendo que essa duração pode ser variada;
- Um receptor de alta fidelidade para medir a superfície de resposta;
- Um sistema de aquisição de dados de sinal para análise do sistema de captura, processamento e armazenamento da forma de onda de movimento da superfície.

Figura 7 - Os principais componentes do método de eco-impacto



Nota: Os componentes que fazem parte da instrumentação do teste do eco-impacto.
Fonte: IMPACT-ECHO INSTRUMENTS, LLC ITHACA, NEW YORK, USA, 2000.

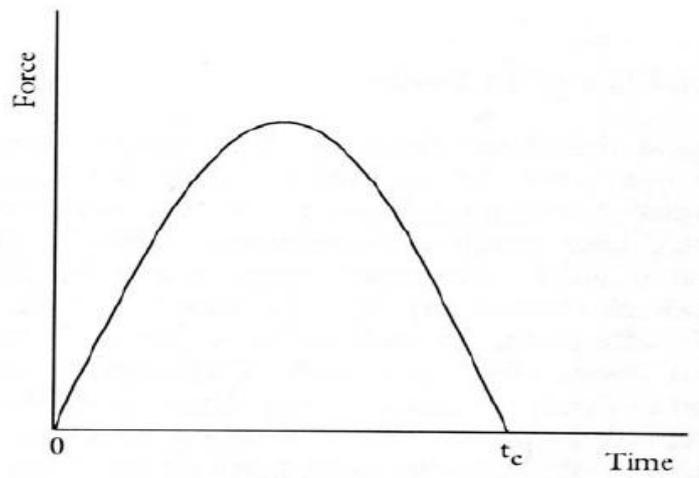
1.1.4.5 Relação de função força-tempo do impacto

Ondas de tensão podem ser produzidas por diversos instrumentos com características diferentes. O método de velocidade do pulso ultrassônico usa uma onda de tensão de transmissão por meio de um transdutor piezoelétrico. No método eco-impacto aplica-se a colisão de uma esfera de aço para gerar ondas de tensão. Os parâmetros que caracterizam a duração do impacto ou tempo de contato são o tamanho da esfera, e a energia cinética da esfera no ponto de impacto.

A variação da força de impacto com o tempo é chamado à função força-tempo, com precisão representada por uma curva senoidal de círculo (SANSALONE; STREETT, 1997). A duração do tempo de contato entre uma pequena esfera de aço e uma superfície de concreto é relativamente curta, variando de 30 a 100 μ s.

Uma ilustração da relação típica da função força-tempo é representada na Figura 8.

Figura 8 - Função força-tempo de um impacto em um sólido



Fonte: SANSALONE; STREETT, 1997.

A ideia básica do ensaio de eco-impacto é o de criar uma vibração ressonante apropriada a fim de excitar o modo da espessura, de forma que o pulso deve conter a correta frequência da componente. Uma vasta distribuição de frequências proveniente das ondas de pressão quando é gerado um impacto. Essa distribuição de frequência é influenciada pela função de força-tempo (tempo de contato ou colisão).

O tempo de contato tem uma dependência muito fraca com a energia cinética (ANDRADE; 2007). Estudos feitos por Sansalone e Streett (1997), propuseram uma relação entre o diâmetro do pêndulo e a frequência máxima útil dada por:

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{291}{D} \quad (12)$$

Onde:

$f_{m\acute{a}x}$ é a frequência máxima de energia útil em khz;

D é o diâmetro da esfera (mm).

Existe um conjunto de ferramentas padrão de 10 diferentes diâmetros de esferas de acordo com a relação descrita na Eq.(12), às frequências úteis para cada tipo de impacto dessa esfera poderia ser tabelados (AKTS, 2007). Além disso, assumindo-se um valor aproximado de 4200 m/s para a velocidade da onda P em concreto, a espessura correspondente poderia ser encontrada como dado na Tabela 2.

Tabela 2 - A relação entre o diâmetro, a frequência máxima útil, e espessura mensurável

Diâmetro (mm)	Máxima frequência (kHz)	Espessura mínima detectável (cm)
3	97	2.1
4	73	2.8
5	58	3.5
6.5	45	4.5
8	36	5.6
10	29	7.0
11.5	25	8.1
13	22	9.2
16.5	18	11.2
20	15	13.4

Fonte: AKTS, 2007.

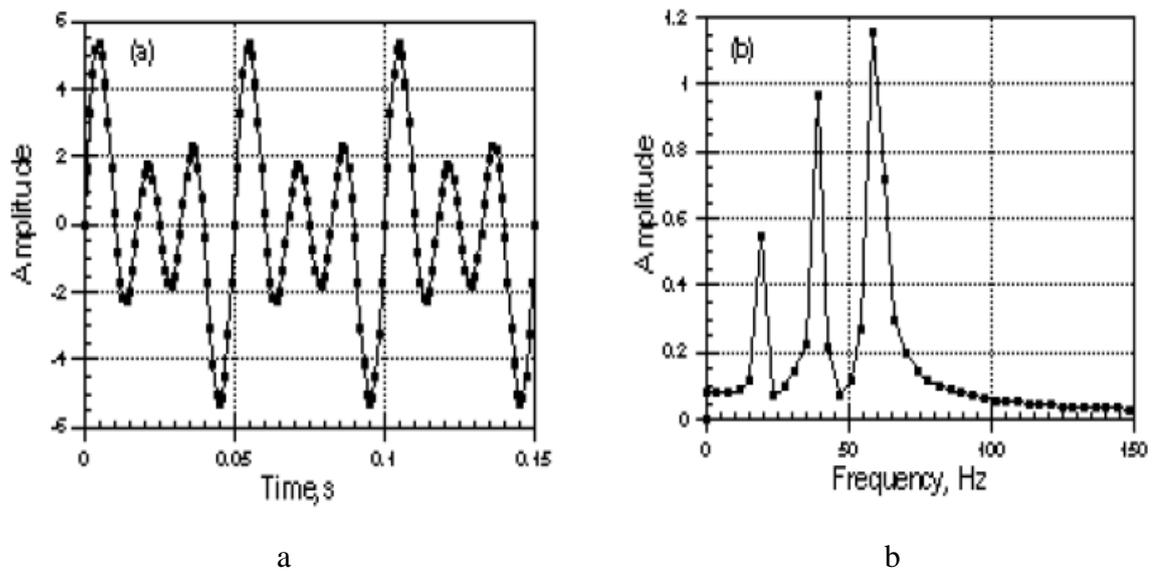
Como as ondas de tensão são obtidas por meio de um impacto, elas contêm uma grande distribuição de frequência e essas distribuições são influenciadas pela função de tempo de colisão. O objetivo da análise de frequência é determinar a frequência dominante do pico na forma de onda contida nesta larga distribuição de ondas.

A técnica que melhor se utiliza para criar espectro de amplitude é a técnica de Transformada de Fourier (TF). Uma vez que, esta técnica assume que, qualquer função em forma de onda, não importa o quão complexa, pode ser escrita por uma série de soma de ondas senoidais. Tomando como pressuposto, a forma de pulso registrado em domínio de tempo, a técnica de Transformada de Fourier mostra as amplitudes de diferentes pulsos de frequência em forma de onda. Essas amplitudes obtidas pelo método de TF contém metade do

número de pontos obtidas na forma de onda no domínio de tempo (CARINO,2001 apud FERRARO, 2003).

A frequência máxima do espectro é metade da taxa de amostragem. A Figura 9a, ilustra gráfico típico de ondas no domínio de tempo que é transformado em espectro típico em domínio de frequência Figura 9b.

Figura 9 - Exemplo de análise de frequência usando Transformada de Fourier



Nota: (a) representa a distribuição de onda no domínio de tempo, (b), representa o espectro de amplitude da frequência correspondente.

Fonte: CARINO, 2001 apud FERRARO, 2003.

Podemos verificar por meio da Tabela 2 que a frequência é máxima, quando utilizamos a esfera de menor diâmetro. Todavia, as esferas maiores produzem forças maiores e maiores amplitudes, conseqüentemente máximas ondas de tensão. A diminuição do diâmetro da esfera diminui o tempo de contato, mas a gama de frequências útil aumenta com uma esfera de menor diâmetro. No entanto, a probabilidade de aumentar a tensão de frequência mais elevadas, tende a dispersar pela homogeneidade do concreto, quando usado esferas de menor diâmetro (SANSALONE; STREETT, 1997).

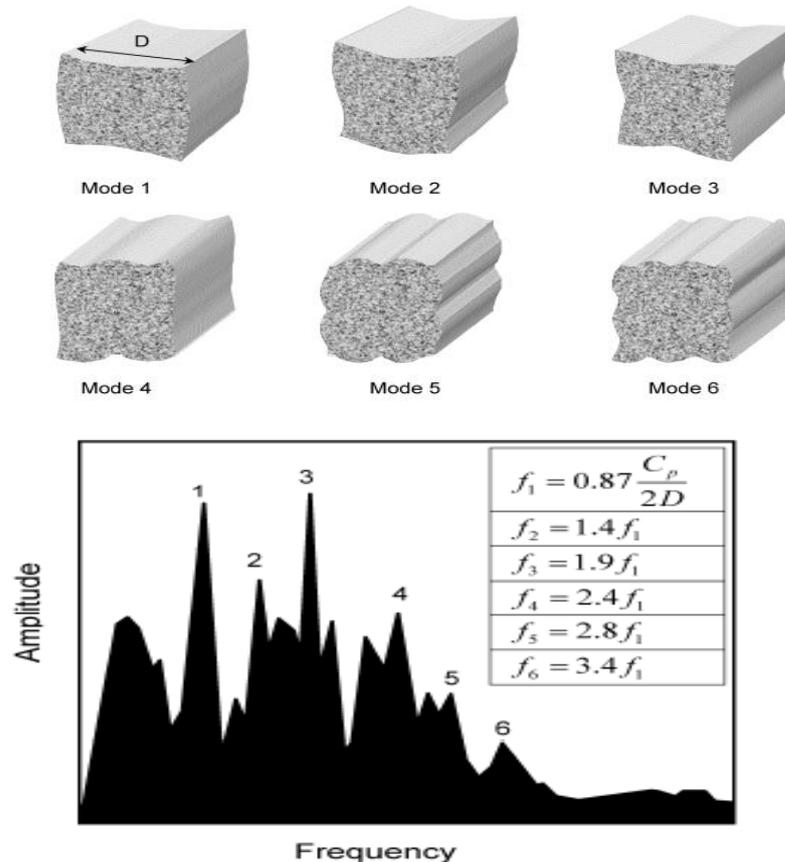
1.1.4.6 Aplicação

O método do eco-impacto tem tido sucesso na detecção de uma variedade de defeitos, tais como poros, delaminações e vazios nas estruturas de concreto. Segundo Carino, (2001) e Sansalone e Street, (1997), o método de eco-impacto teve êxito para descoberta de uma variedade de defeitos, como vazios, porosidade, delaminações expostas e revestimento de lajes para estrutura de placas de concreto.

Aplicação do método foram propostas ou estendidas para algumas estruturas prismáticas tais como: colunas e vigas. Alguns autores como, Lin e Sansalone (1992a, 1992b, 1992c apud Carino, 2001), verificaram que as reflexões a partir do dessas estruturas causam modos complexos de vibração e que estes modos de vibrações resultam no espectro de amplitude com vários picos que não estaria relacionado com a frequência dominante no espectro. Mas, era possível demonstrar que ainda poderia detectar defeitos dentro de vigas e pilares sendo que aplicações de campo tem tido bons resultados.

Sansalone e Street, (1997), descreve que essas complexidades sejam evitadas e que os modos transversais estejam associados a menor dimensão lateral da estrutura deve ser pelo menos cinco vezes a espessura (ver Figura 10).

Figura 10 - Os primeiros 4 modos correspondem ao espectro de amplitude experimental para sólido de 0.3 m.



Fonte: LIN; SANSALONE, 1992b; CARINO, 2001.

No entanto, o desenvolvimento de um método de teste padrão para detecção de falhas como a do eco-impacto é difícil por causa de umas séries de variáveis que podem ser encontradas em teste de campo. Podendo os defeitos variar de caso simples como vazios para casos mais complexos de distribuição de microfissuramento.

A medição da espessura de uma estrutura de concreto em forma de placa é uma aplicação relativamente simples que é susceptível de normalização (CARINO, 2001).

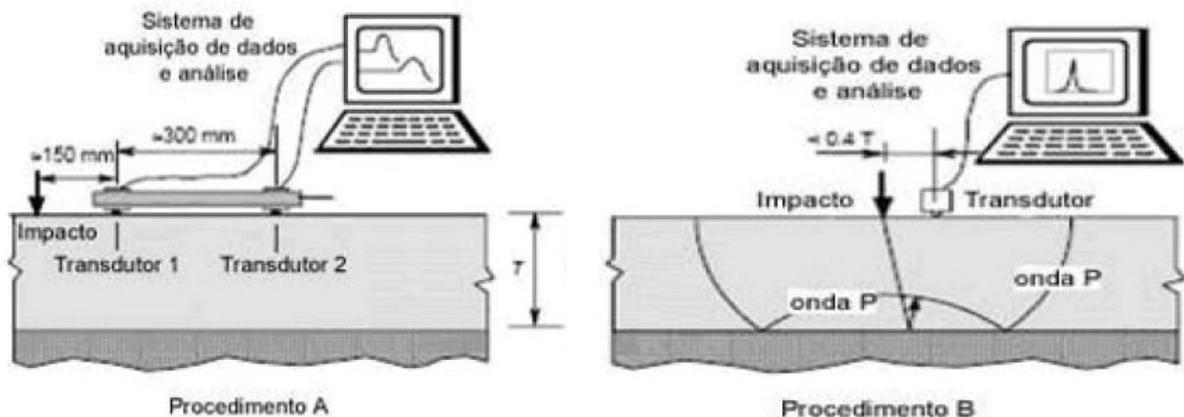
A ASTM C1383-98 estabelece dois tipos de procedimentos para medições de espessura de concreto (ver Figura 11).

O procedimento A é usado para medir a velocidade da onda P no concreto. Esta medida é baseada na medição do tempo de percurso da onda P entre dois transdutores a uma distância pré-determinada de 300 mm (ver Figura 11a). A duração do impacto deverá ser de 20 a 40 μ s e a distância entre o ponto do impacto a primeiro transdutor deve ser aproximadamente de 15 cm. Recomenda-se ainda que se deva utilizar esferas (o que produz

impacto) com diâmetro entre 5 mm e 8 mm e que a velocidade da onda P obtida por este procedimento deve ser multiplicado por 0,96 quando usado a Eq.(11).

Para o procedimento B, a velocidade de propagação de onda através da frequência usada para determinar a espessura de uma placa de concreto, pode ser obtida usando a Eq.(11). Nesse procedimento recomenda-se o uso de esferas com diâmetro entre 8 mm e 16 mm e uma distância entre o ponto do impacto e o transdutor deve ser menor do que 0,4 da espessura da peça como ilustra a Figura 11b.

Figura 11 - Dois procedimentos para a medição da espessura de placas de concreto de acordo com ACTM C 1383-98



Nota: Procedimento A é usado para determinar a velocidade de onda P e Procedimento B é usado para determinar a frequência de espessura.

Fonte: CARINO, 2001.

1.1.4.7 Benefício da aplicação do método eco-impacto

Aplicações do método eco-impacto têm suas vantagens como na inclusão de programas de controle de qualidade, como a medição da espessura do pavimento, avaliar a integridade de uma estrutura de concreto, na manutenção de rotina para detectar fissuras, vazios, delaminações ou em lajes de concreto, de forma a obter as áreas de danos e possíveis corrosões nas estruturas de concreto. Eco-impacto pode ser utilizado para um controle de qualidade, ou na resolução de dúvidas sobre a qualidade dos materiais ou de construção.

2 METODOLOGIA

No desenvolvimento deste trabalho, para definir a melhor metodologia e condições de trabalho na execução da pesquisa, optou-se, numa primeira etapa, verificar a metodologia que melhor adequasse para medidas do tempo de percurso da onda de tensão em um ensaio de eco-impacto, através da técnica de propagação de ondas.

Pretende-se ainda nesta seção, fazer um breve relato dos elementos que foram utilizados no sistema de instrumentação assim como, procedimentos decorrentes dos estudos, procurando adequar os componentes às necessidades, tendo atenção particular no tipo de sinais a adquirir (ondas de tensões baixas frequência) de forma a validar os objetivos propostos.

Definiu-se a melhor metodologia e condições de trabalho na aquisição dos sinais, visando aprimorar a confiabilidade desta técnica.

2.1 Variáveis de interesse

Para que tenhamos o êxito neste trabalho, pretende dar-se a conhecer, de forma detalhada, os parâmetros que, de forma direta ou indireta, afetam a estrutura e os sistemas em estudo. Assim sendo, as grandezas físicas que se pretende apurar e registrar são as seguintes:

- Tipos de ondas quando uma perturbação ou impacto é provocado em uma estrutura de concreto;
- Frequência obtida na faixa 10 kHz quando provocado, o impacto gerado, criar uma vibração ressonante que corresponde ao modo natural da espessura;
- Captação dessa frequência;
- Sensores, capazes de ter uma elevada sensibilidade, resistência moderada ao meio ambiente de forma a captar essa frequência;
- Armazenamento e tratamento de dados, uma vez que, as ondas produzidas proveniente de um impacto, serão capturadas por transdutor (sensor) e armazenadas em um banco de dado por meio de *software* do osciloscópio.

2.1.1 Montagem experimental

Mediante os parâmetros propostos na seção 2.1 assim como as características segundo as quais se pretende com essa mesma aquisição de dados (seção 2.1), foi necessário fazer uma pesquisa sobre o tipo de sensores disponíveis a preços acessíveis.

Dessa forma, para sustentar os objetivos inicialmente traçado na seção 2.1, um sistema capaz de fazer aquisição de dados a baixo custo e com elevada versatilidade, foi de extrema importante distinguir as categorias de sensores visto que, a sua relevância para o sucesso desta dissertação influenciava, e muito.

As características gerais dos sensores com que se pretende adquirir os parâmetros conforme mencionados na seção 3.1, foi necessário utilizar para nosso estudo, sensores de vibração piezoelétrico, a razão, pelo fato do teste do eco-impacto ter um modo de vibração próprio e, conseqüentemente, caso a vibração a medir tenha uma frequência de oscilação próxima da frequência natural do corpo de prova e por ser um sensor de características peculiares. Algumas destas características do sensor piezoelétrico podemos ver na seção 2.1.1.1.

2.1.1.1 Sensores piezoelétrico

Materiais que quando aplicado uma deformação ou pressão, produzem uma tensão diferencial proporcional à deformação a eles aplicada. Este fenômeno descoberto em 1880, por Pierre e Jacques Curie foi denominado de efeito piezoelétrico (CASSIOLATO, 2011). Materiais de cristais de quartzo, turmalina, sal de Rochelle, topázio, etc. exibem efeito piezoelétrico em seu estado natural.

No primeiro momento, testamos vários sensores piezoelétrico no sentido de verificar dos quais melhor apropriassem para recolha de dados com seu correto funcionamento. Em benefício de precaver eventuais erros de medições que podem ser provocados pelos próprios sensores, simples testes foram plausíveis avaliar as principais características dos sensores para os estudos preconizados.

O efeito piezoelétrico é reversível, pois, os cristais piezoelétricos, quando sujeitos a uma voltagem externa, podem sofrer variações de forma. A deformação do sensor tem aplicações

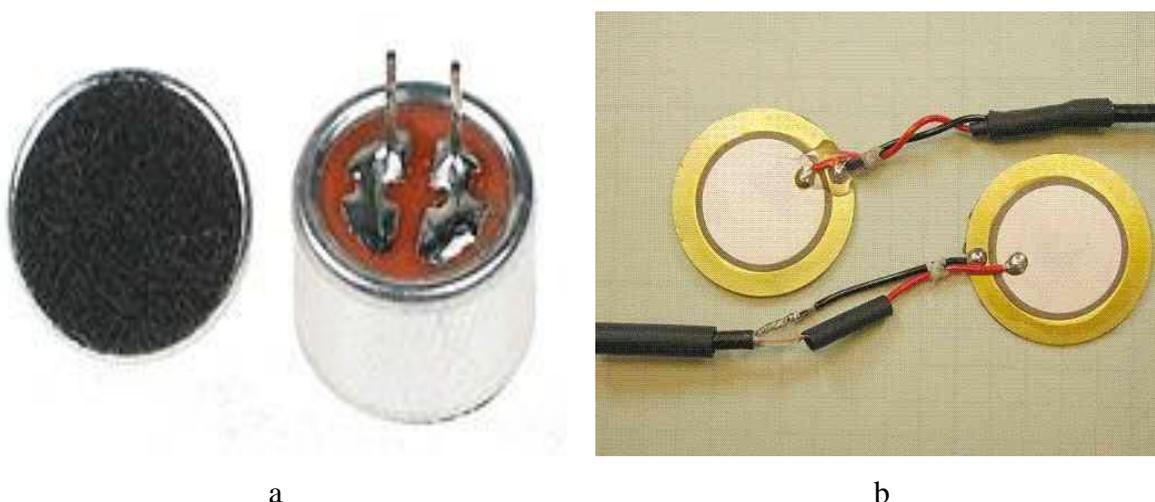
importantes, tais como a produção e detecção de sons, geração de altas voltagens e geração de frequência electrónica.

Neste tipo de sensor, a banda de frequência útil está limitada pelas características inerentes ao próprio cristal que, devido à sua constituição, gera um efeito do tipo filtro. Portanto, quando a frequência da vibração é baixa o cristal atenua a vibração, deturpando os resultados. No entanto, a principal vantagem desta tecnologia ainda é a sua reduzida dimensão, uma vez que a massa e o cristal podem ser muito pequenos (SAKAMOTO, 2006).

Na aplicação deste trabalho, utilizamos um KDR5000, ou seja, um microfone de eletreto e *Buzzer Piezo* como ilustrado na Figura 12, pelo fato de serem de baixo custo, e principalmente, a fácil utilização. São materiais que podem ser encontrados em aparelhos telefônicos, microfone, nobreak, brinquedo de criança, entre outros. Esses tipos de sensores são constituídos de um diafragma e uma fina película de eletreto que quando é excitados, mantém sua carga permanente e isso, permite que eles operem com tensões extremamente baixas, não sendo necessário alimentá-los com uma voltagem muito elevada.

Segundo Patsko, (2006), esses materiais, por possuírem internamente um Transistor de Efeito de Campo (*Field Effect Transistor- FET*), funciona como um buffer, eliminando problemas de impedância e capacitância que pode haver durante o seu funcionamento por este motivo, por esse motivo fazem desses materiais, ideais para nossa pesquisa.

Figura 12 - Ilustração de sensores utilizados nos experimentos



Nota: Microfone de eletreto (a) e Buzzer peizo (b).
Fonte: O autor, 2014.

Um material piezoeléctrico é consequentemente capaz de agir como um elemento detector, atuador, ou ambos, tornando-se interessante a sua utilização em dispositivos do

estado sólido/compactos, sendo de extrema confiança e eficiência. Por este motivo, tomamos como referência este material para nosso estudo. Mas, para utilização desses materiais em nossos estudos, verificamos que estes, precisavam ser amplificados.

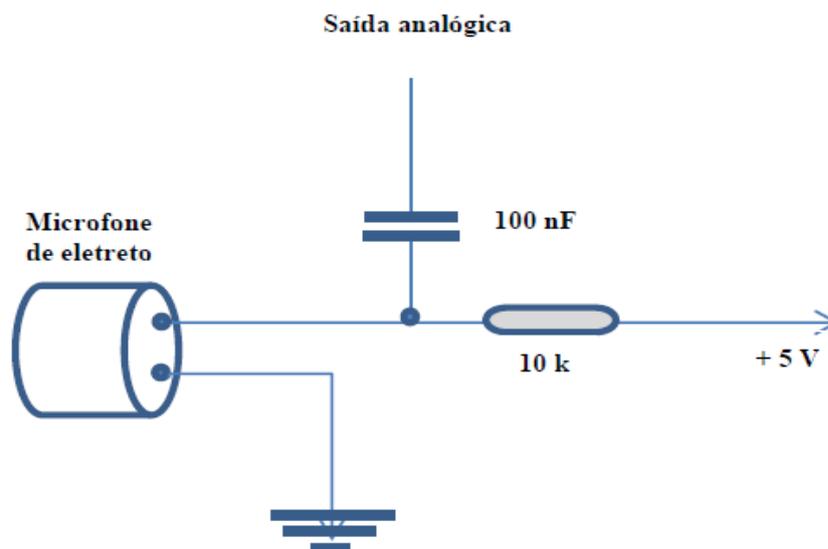
2.1.1.2 Amplificador de sinais

Para uma maior sensibilidade dos sinais, fez-se um condicionamento como ilustrado na de modo aumentar a resolução e reduzisse o ruído de maneira a termos uma melhor precisão.

Foi necessário uma fonte de corrente de 5V para alimentar do sensor, um resistor de forma a limitar a corrente que alimenta o sensor, um sinal DC (que alimenta o circuito), é separado do sinal AC (sinal variável que será gerado pelo sensor), por uma capacitor que servira de bloqueio dos sinais contínuos, e em contrapartida, deixa passar o sinais variáveis que é chamado capacitor de desacoplamento (PATSKO, 2006).

Tendo isso feito, temos então um sinal variável que produz fielmente as vibrações quando são causadas pelas ondas que no nosso caso, quando um impacto é causado.

Figura 13 - Esquema de condicionamento de sinais na ligação dos sensores



Fonte: O autor, 2014.

2.1.1.3 Aquisição de dados

Há diversos protocolos de comunicação, sistemas de aquisição e armazenamento de dados, porém não há no mercado sistemas, a baixos custos, que permitam a utilização simples e versátil. As soluções comerciais acessíveis estão normalmente limitadas a um determinado protocolo ou tipo de comunicação. Esta limitação normalmente implica a utilização de sensores do mesmo fabricante que o equipamento de aquisição e licenças de software para a leitura dos dados. Caso se pretenda uma solução mais versátil, eventualmente com capacidade de transmissão de informação por sensor que é o nosso caso, o custo torna-se desconfortável para os pequenos projetos com recursos limitados.

Uma vez que, pretendemos alcançar os nossos objetivos propostos, realizando projeto e um protótipo de um sistema de baixo custo, versátil e baseado em componentes acessíveis no mercado para armazenamento de dados on-board, foram feitas várias tentativas de teste com de forma a testar que forma melhor adequasse para o estudo em questão, cujos detalhes não são aqui relevantes.

Porém, mediante todos esses testes, duas diferentes formas de aquisição de dados nos despertaram atenção. A primeira versava em ter o *Arduino* (seção 3.2.4.1) e fazer leitura dos sensores e transferir na sua porta serial as mesmas. Um computador portátil, ligado através da porta USB ao *Arduino*, faz a recolha dos dados por meio de e uma de programação gráfica originária da National Instruments conhecido com *LabVIEW* (seção 3.2.4.2) que mostrava na forma de gráfico em tempo real e armazenava os dados em um disco rígido. Esta primeira abordagem revelou ser muito prática e simples, adequando-se bem às primeiras necessidades. No entanto, com evolução do trabalho, constatou-se que esta solução trazia problemas com aquisição de dados obtidos. Uma vez que, as ondas capturadas não estavam relacionadas com as componentes de frequência do espectro do corpo de prova. Constatamos ainda, que a velocidade de transmissão de dados estava limitada à velocidade da porta serial assim como a velocidade máxima com que o *LabVIEW* conseguia plotar o gráfico e gravar no disco rígido. Previamente, durante os testes como o protótipo produzido não tivemos êxitos em captura de ondas com a ideal frequência para estudo em questão.

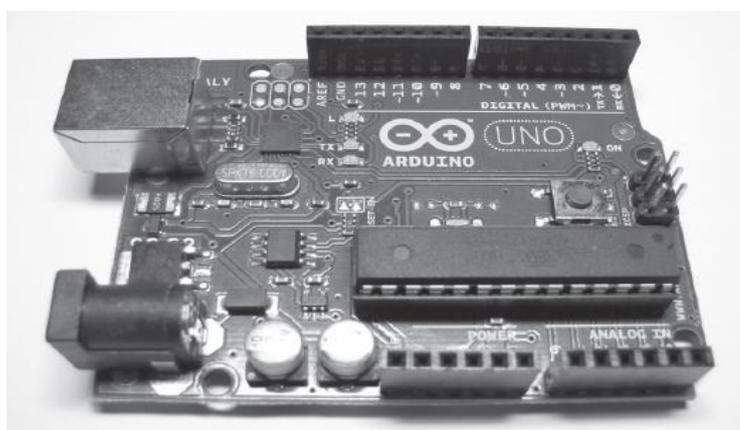
Para que levássemos a diante este trabalho, no segundo momento, optamos por conectar o sistema do sensor por um osciloscópio (seção 3.2.4.3), e osciloscópio por meio do USB para computador com a utilização do *software* “*OpenChoice Desktop*”, que por sua vez

tivemos um resultado melhor do no primeiro protótipo, com isso, tomamos como base para nosso experimentos.

2.1.1.4 Arduino

Arduino é um microcontrolador de placa única e um conjunto de software para programá-lo. O hardware consiste em um projeto simples de hardware livre para o controlador, com um processador Atmel AVR e suporte embutido de entrada/saída. O software consiste de uma linguagem de programação padrão e do bootloader que roda na placa (MCROBERTS, 2011).

Figura 14 - Configuração de um Arduino



Fonte: MCROBERTS, 2011.

O *Arduino* pode ser utilizado para desenvolver objetos interativos independentes, ou pode ser conectado a um computador, a uma rede, ou ate mesmo a Internet para recuperar e enviar dados do *Arduino* e atuar sobre eles. Em outras palavras, ele pode enviar um conjunto de dados recebidos de alguns sensores para um site, dados estes que poderão, assim, ser exibidos na forma de um gráfico que para nossa pesquisa seria fundamental.

2.1.1.5 LabVIEW

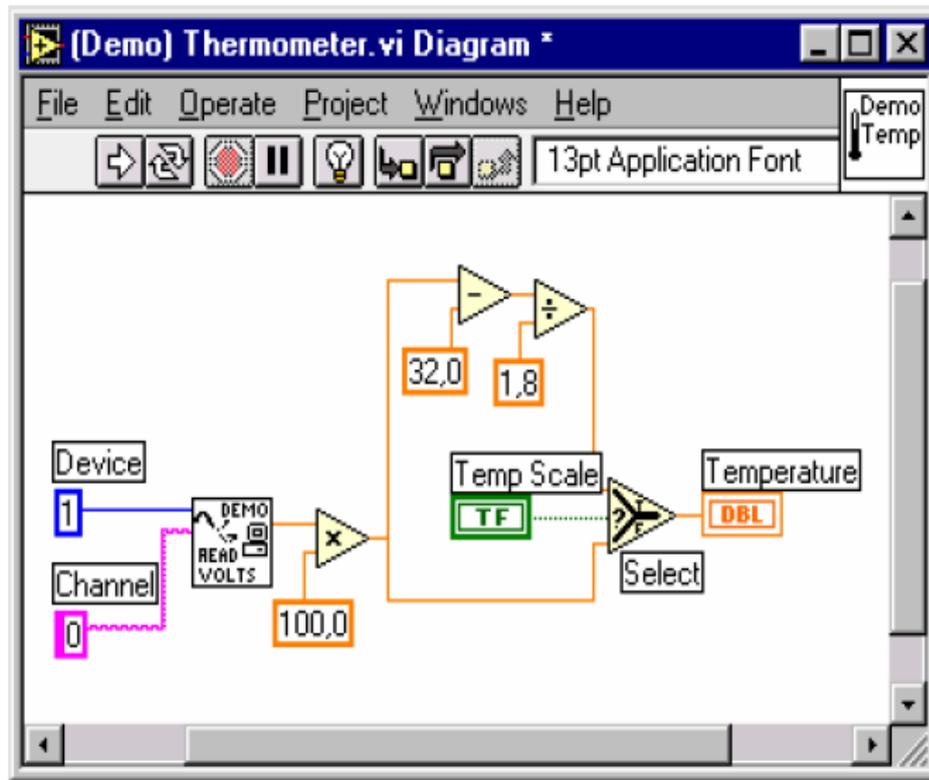
O *LabVIEW* é uma linguagem de programação gráfica originária da National Instruments. A primeira versão surgiu em 1986 para o Macintosh e atualmente existem também ambientes de desenvolvimento integrados para os sistemas operacionais (CINEL, 2004).

Os programas em *LabVIEW* são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente, IVs. São compostos pelo painel frontal, que contém a interface, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. O programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado. Deste modo o desempenho é comparável e exibida pelas linguagens de programação de alto nível.

Cada painel frontal tem o seu correspondente diagrama de blocos, o qual traduz o programa de VI. Sendo assim o diagrama de blocos é construído usando a linguagem gráfica de programação G que são chamados também de código-fonte (CINEL, 2004).

Os componentes do diagrama de blocos nos constituem do programa, por exemplo, estruturas de algoritmia como “Loops” e “Cases”, ou ainda funções aritméticas que são ligados através de traços que podem representar fios condutores, ou simplesmente fluxo de dados como mostrado na Figura 25.

Figura 15 - Componentes do diagrama de blocos LabVIEW



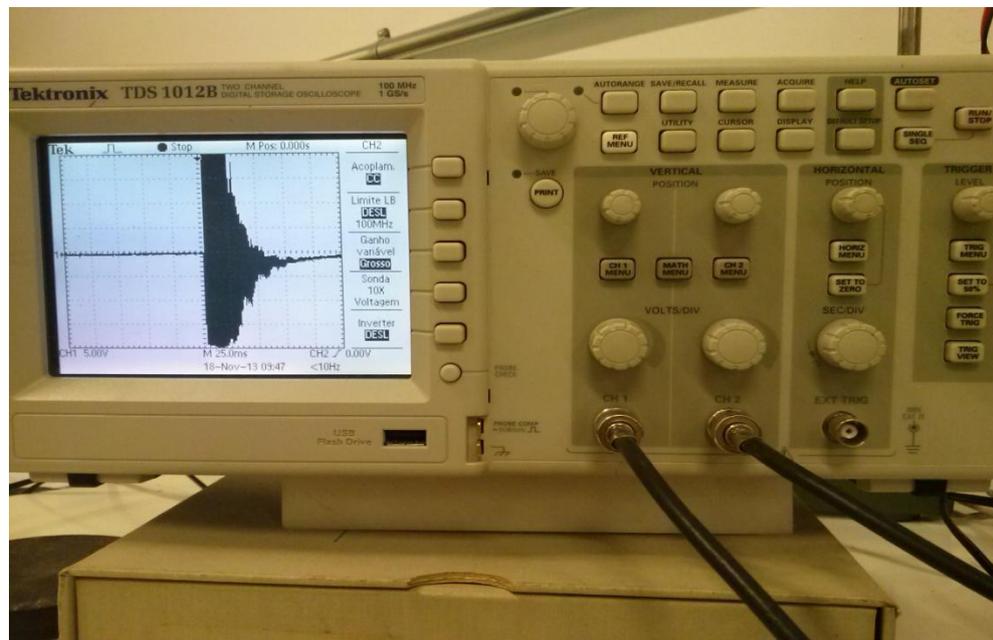
Fonte: CINEL, 2004.

Com o *LabVIEW* podemos usar um VI, como sendo um sub-VI. Esta filosofia de trabalho faz com que os diagramas de blocos sejam modulares e fáceis não só de compreender, como também de corrigir e alterar, por esta razão, esta plataforma seria ideal para nossa pesquisa.

2.1.1.6 Osciloscópio

Para sucesso deste trabalho, com a utilização de um osciloscópio digital, da marca Tektronix, modelo TDS 1012B, 100MHz, 4 canais com taxa de amostragem de 1GS/s por canal simultâneo para fazer leitura de ondas capturada. Um instrumento de medição eletrônica, com características gráficas visíveis de uma ou mais diferenças de potencial, realiza uma variedade de funcionalidade, como por exemplo, adquirir sinais em forma de onda.

Figura 16 - Ilustração do osciloscópio da Tektronix TDS 1012 B utilizado no experimento



Fonte: O autor, 2014.

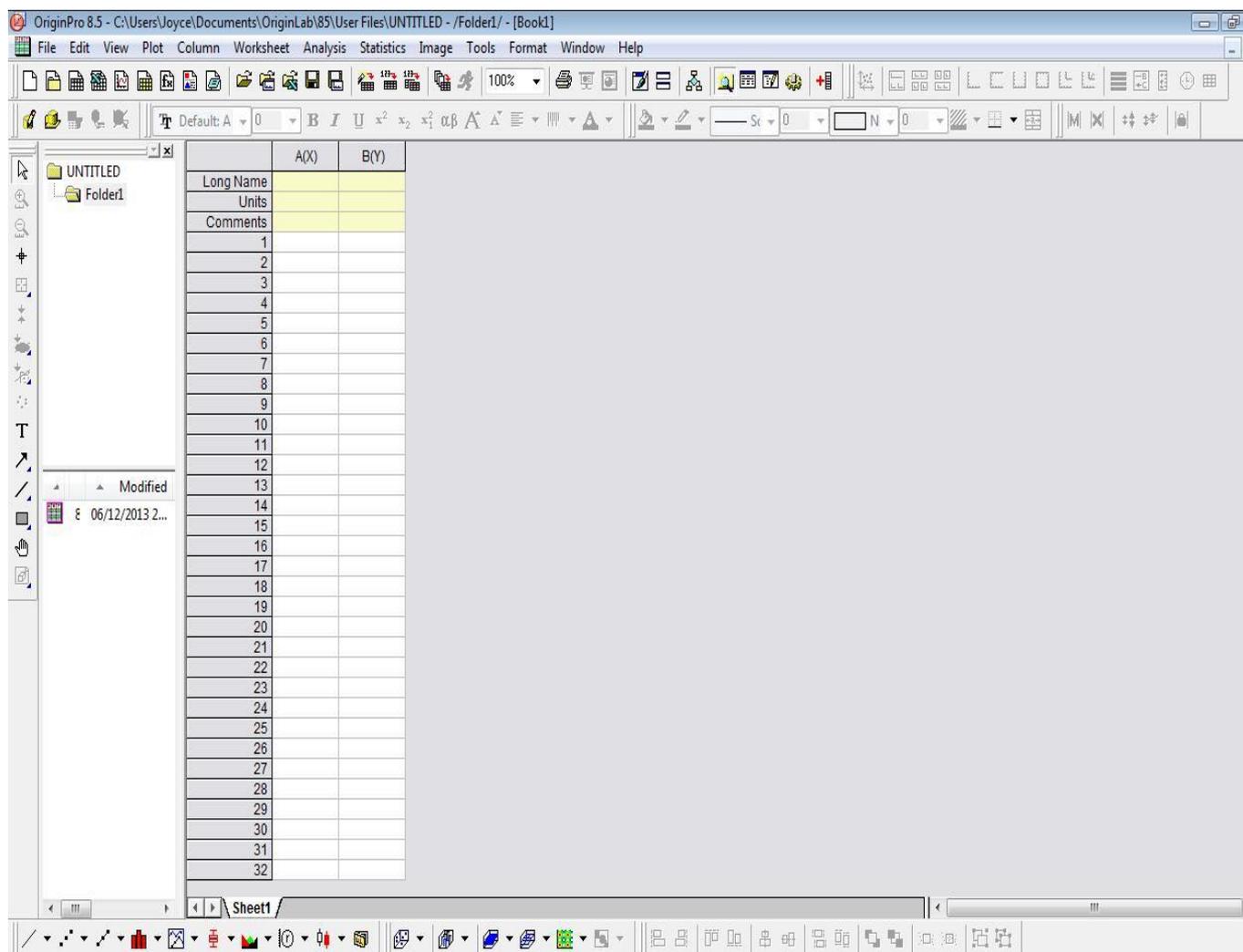
2.1.1.7 Tratamento de sinal

Para o tratamento de dados utilizamos o *software OriginPro8.5*. Seu rico conjunto de recursos, um projeto orientado a objetos e acesso programático para todos os gráficos e funcionalidade de análise levou-nos a ter este *software* como nossa ferramenta de trabalho para nosso tratamento de dados. *OriginPro8.5* oferece uma plataforma ideal para o desenvolvimento de aplicações customizadas.

Personalização simples pode incluir a criação de modelos de gráficos personalizados para uso repetido. Segundo Corporation, (2007), o recurso modelo também pode ser estendido para análise, onde uma pasta de trabalho com as configurações de análise personalizada e saída desejada pode ser salva como um modelo de análise para o uso repetido. O Modelo de análises possa então ser utilizado para realizarem uma análise em lotes em vários ficheiros e bases de dados. A planilha de *OriginPro8.5* pode ser personalizada através da inserção de objetos como imagens e gráficos e mesclar células para criar relatórios personalizados. Tais relatórios personalizados podem ser incluídos como parte de um *Template Análise*. Por esta razão, escolhemos esta plataforma para realização de análise e tratamento dos dados obtidos

com *OpenChoice Desktop*, (ver item 2.1.1.3). Podemos ver na Figura 17 uma ilustração da plataforma de *OriginPro8.5*.

Figura 17 – Ilustração de plataforma de OriginPro 8.5



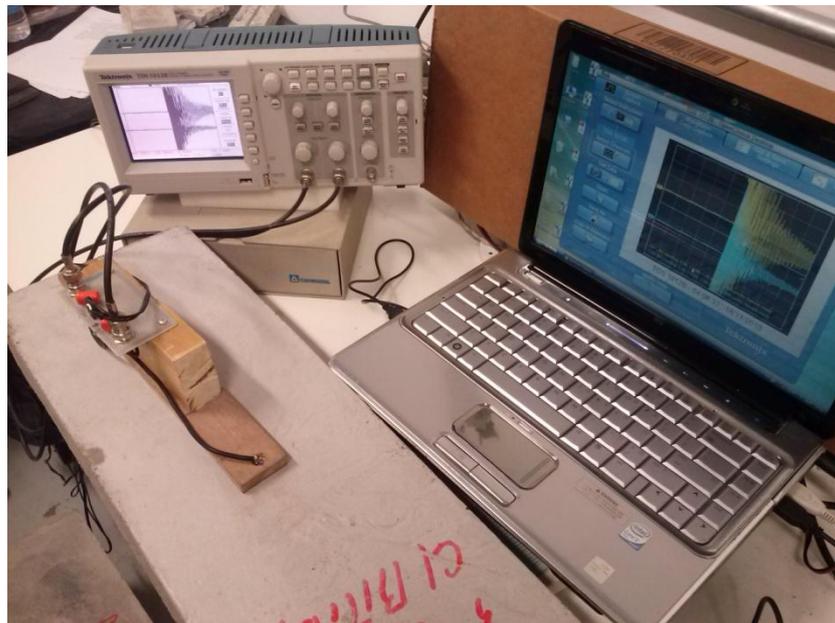
Fonte: O autor, 2014.

Com essa plataforma, foi possível analisarmos os dados extraídos e deste, obter melhores resultados.

2.1.2 Equipamento utilizado no ensaio

Para ensaios experimentais foram utilizado um protótipo do Eco-impacto produzido no laboratório de ensaio físico do Instituto Politécnico do Rio de Janeiro (UERJ/IPRJ) como ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Protótipo do Eco-impacto utilizado no processo experimental.



Fonte: O autor, 2014.

2.1.3 Ensaio e procedimento experimental

Nesta parte do trabalho, foi reservado para apresentar os ensaios assim como, os procedimentos experimentais decorrente desta pesquisa.

Foram produzidas dez amostras com diferentes dimensões como disposto na Tabela 3.

Tabela 3 - Descrição das amostras

Amostras	Dimensões (cm)	Propriedades	
		(X) Sem brita	(+) Com brita
Corpo 1	60 x 10 x 5	X	X
Corpo 2	59,9 x 19,9 x 9	X	X
Corpo 3	59,7 x 38,4 x 26,8	X	
Corpo 4	60 x 20 x 5	X	X
Corpo 5	76,6 x 36,8 x 9	X	
Corpo 6	100 x 10 x 5	X	X

Fonte: O autor, 2014.

O concreto produzido como corpo de prova para os experimentos, foi confeccionado no Laboratório de Ensaio Físico do Instituto Politécnico do Rio de Janeiro (IPRJ-UERJ) onde adotamos dois traços de concreto com mesmo tipo cimento, sendo que, cinco corpos de prova foram adicionados um tipo de agregados, ou seja, acrescentamos brita como mostra a Tabela 3. Para uma compactação de moldes e corpo de prova, foi adensado mecanicamente por um vibrador de agulha como prescreve a NBR 5738, (1994).

A Figura 19, mostra alguns desses corpos de prova na fase de adensamento.

Figura 19 - Concretagem das amostras





Fonte: O autor, 2014.

Com o corpo de prova concluído e o sistema do eco-impacto montado, sensores, martelo contendo imãs esféricos de dimensões (0,8 cm, 16 cm e 1,9 cm), osciloscópio e computador portátil;

Limpendo a superfície de corpo de prova na região em que pretende colocar o sensor para medição com uma estopa, em seguida colocamos um acoplante (graxa de silicone);

Acoplado o sensor na região preparada, e os ajustes no osciloscópio para uma perfeita visualização da amplitude e da base do tempo de forma a ter uma melhor sensibilidade por parte do osciloscópio para uma perfeita aquisição de dados;

Com o osciloscópio ajustado, um impacto é provocado a uma distancia do sensor de 5 a 15 cm conforme a norma descrita no item 1.1.4.6, o sinal captado pelo sensor é assim, transmitido ao osciloscópio onde são observados em forma de ondas;

Assim, essas ondas são gravadas, ou melhor, travamos o osciloscópio pelo botão “*RUN/STOP*”. No computador, onde está conectado o osciloscópio, abrimos o programa “*OpenChoice Desktop*” de modo a capturar a imagem do gráfico e os dados. Sendo que essas capturas são de formas diferentes;

Para captura de gráfico, temos a seguinte sequência: Abrir o programa “*OpenChoice Desktop*” > Select Instrument > USB::0x0699::0x0366::C010402::INSTR > OK > Screen Capture > Get Screen > Save As;

Para captura de dados, temos a seguinte sequência: Abrir o programa “*OpenChoice Desktop*” > Select Instrument > USB::0x0699::0x0366::C010402::INSTR > OK > Waveform Data Capture > Select Channels > Get Screen > Save As;

Os dados obtidos são analisados por meio do programa *OrginPro 8.5*.

2.1.3.1 Procedimento de análise

Para análise de corpo de prova, necessitamos de um conhecimento prévio da velocidade da onda C_p e a variação de tempo para que essas ondas cheguem aos transdutores. E isso, pode ser obtido através de dois procedimentos conforme a norma supracitada no item 1.1.4.6 (ASTM C1383-98), mas, neste trabalho, para estimar a velocidade da onda, apenas utilizaremos o procedimento A.

De acordo a norma ASTM C1383-98, foram testada a posição dos transdutores a uma distância de 15 cm do ponto de impacto.

O tempo de aquisição de dados no mostrador digital do osciloscópio foram tomados como 10 ms a uma amplitude de 5 volts. Procedimento esses que melhor adequou para uma melhora visualização dos gráficos obtidos quando produzia o impacto.

Com esses processos feitos (regulagem da escala), a obtenção das ondas para possível determinação da velocidade da onda foi tomada como dito anteriormente (pelo procedimento A) da norma ASTM C1383-98. Fixando dois transdutores à superfície da amostra já preparada (superfície limpa e aplicado com a graxa de silicone para melhor acoplamento), a uma distância de 0,3 m. Para obter a velocidade da onda, dividimos essa distância (0,3 m), pela variação de tempo (Δt) em que a onda de tensão percorre essa distância ao segundo transdutor.

Uma vez que, essas ondas de tensão pode ser P ou R, multiplicada o resultado da velocidade da onda C_p por 0,96, como podemos ver na Eq.(13).

$$C_p = \frac{L}{\Delta t} \cdot 0,96 \quad (13)$$

onde :

C_p = velocidade da onda;

L = distância entre os transdutores;

Δt = variação de tempo decorrido.

Com a velocidade da onda obtida, utilizou-se o procedimento B da mesma norma para obtenção da frequência dominante das amostras em estudos.

A determinação da espessura, através do domínio da frequência pelo procedimento B conforme a ASTM C1383-98, foi utilizado um martelo onde um imã esférico de 8 mm de diâmetro é atraído pelo aço do martelo de forma a ter um objeto de produção do impacto (ver a Figura 20), como recomenda a norma ASTM C1383-98, ver no item 1.1.4.6.

Figura 20 - Impactor utilizado no experimento



Fonte: O autor, 2014.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

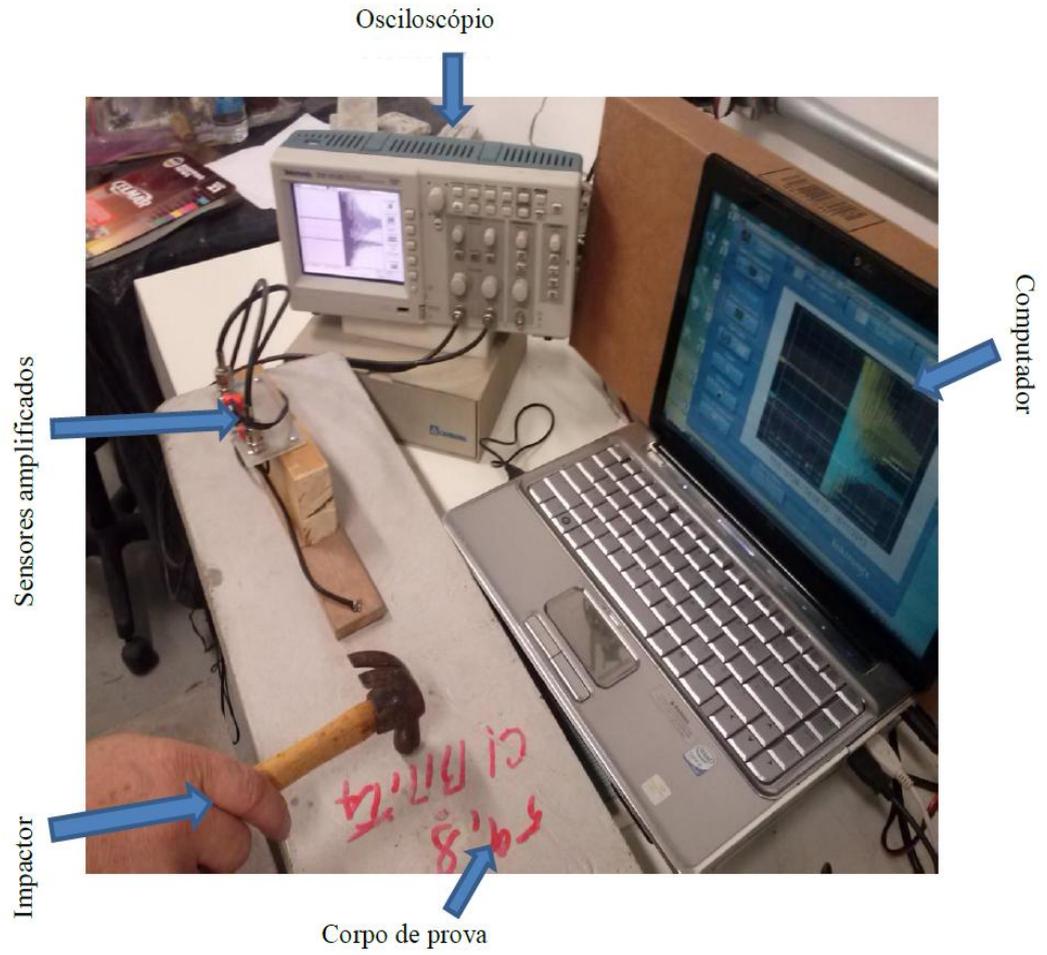
A utilização do método do eco-impacto na avaliação do corpo de prova buscou avaliar a eficácia do equipamento produzido no laboratório e na obtenção de leitura confiáveis. Entretanto, as análises desses dados decorreram de duas formas conforme o procedimento citado no item 1.1.4.6.

Para definição dos parâmetros a serem adotados, foram testado três dimensões diferentes de esferas, a 0,8; 1,6 e 1,9 cm de diâmetro sendo que, a de 1,6 e 1,9 cm não se pôde ter uma forma de onda adequada. Assim, tomado como padrão para todos os testes a de 0,8 cm que obteve formas de ondas desejadas e a distância entre os transdutores foram tomados como sendo de 0,3 m.

Segundo os estudos feitos por vários autores como, Sansalone; Streett, (1998); Carino, (2001); Andrade; Civil, (2007), o erro relativo da espessura real encontrado foi de 3 a 5% , o que tomaremos como o parâmetro de avaliação neste trabalho.

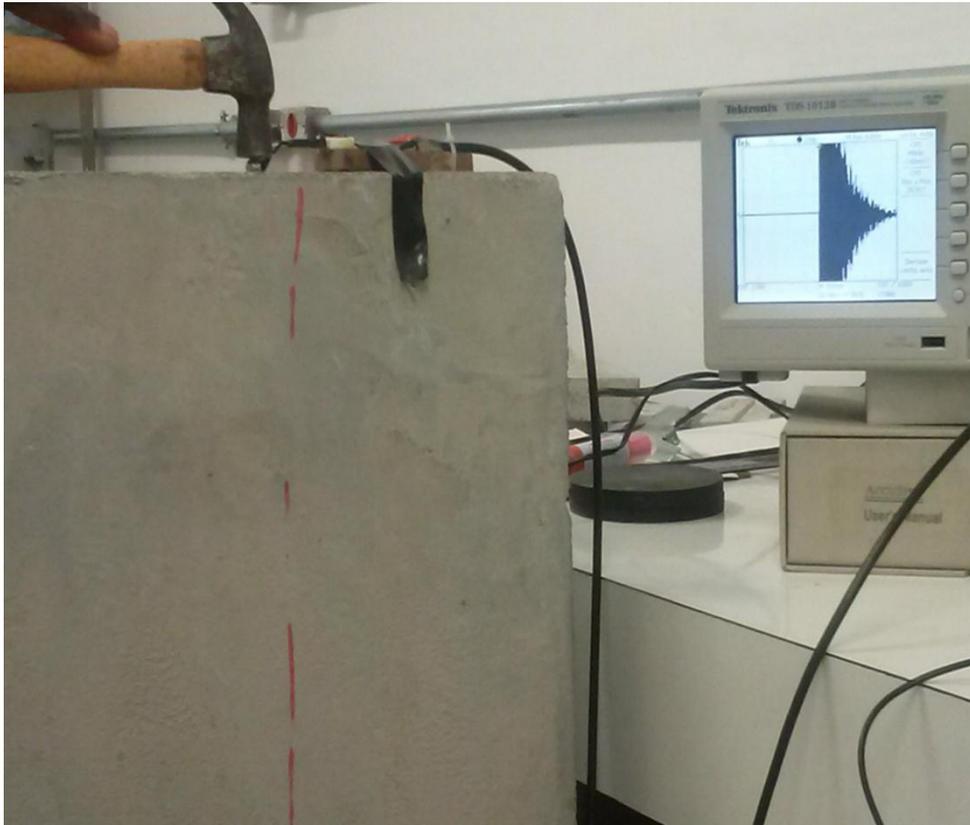
Na Figura 21, temos a realização de teste com eco-impacto para obtenção de velocidade de onda e com a obtenção da velocidade, num sendo momento a realização do teste para obtenção da frequência fundamental das amostras Figura 22.

Figura 21 - Teste para obtenção de velocidade com sistema de Eco-Impacto



Fonte: O autor, 2014.

Figura 22 - Teste para obtenção da frequência dominante com eco- impacto

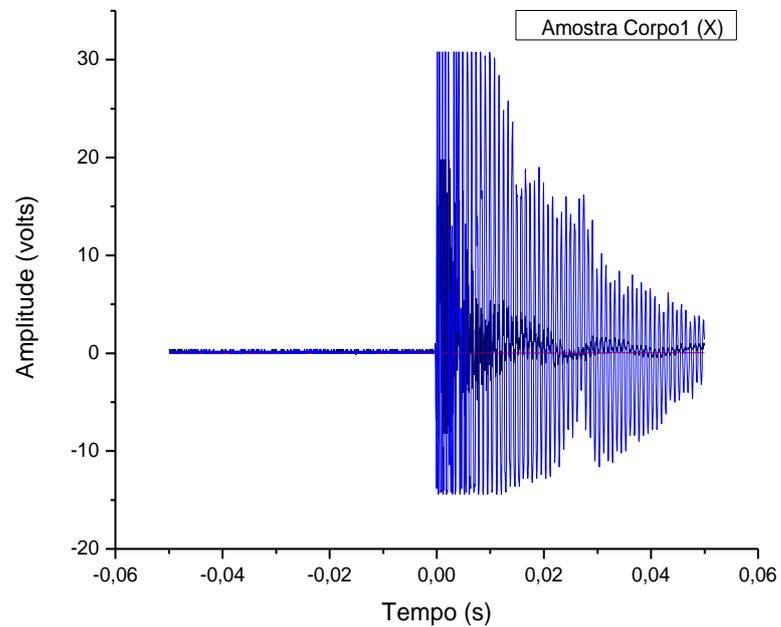


Fonte: O autor, 2014.

3.1 Amostra corpo1 (X).

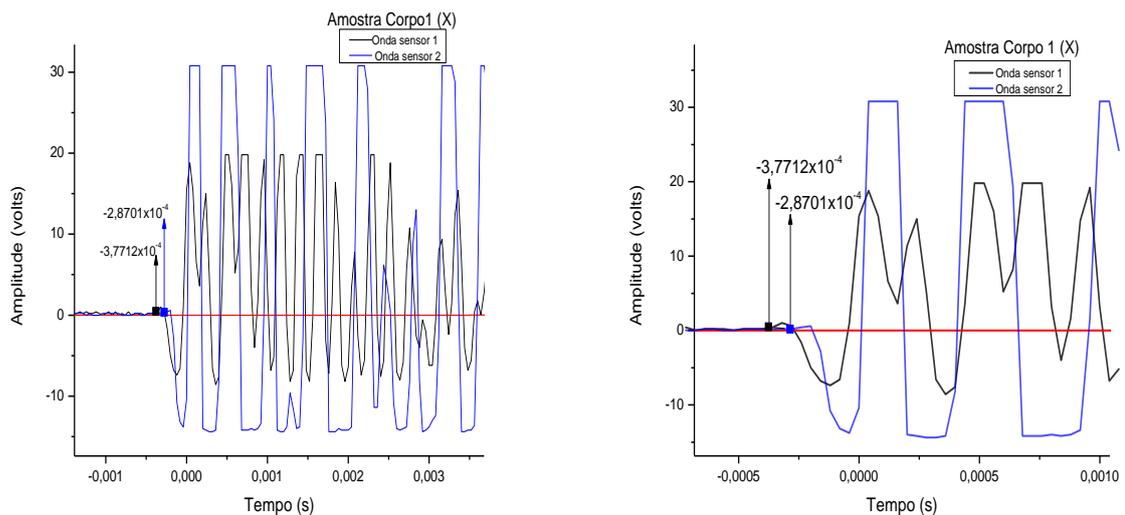
De acordo com o procedimento A, obtemos a propagação da onda amostra Corpo1 (X) Tabela 3, como ilustra na Figura 23. Porém, para uma melhor visualização das variações do tempo entre os transdutores após o impacto, o gráfico da Figura 23 foi ampliado em dois estágios, como ilustra na Figura 24.

Figura 23 - Gráfico obtido das ondas com Eco-Impacto para obtenção velocidade a partir da variação do tempo da amostra Corpo1 (X).



Fonte: O autor, 2014.

Figura 24 - Gráfico obtido das ondas com Eco-Impacto para obtenção velocidade a partir da variação do tempo da amostra Corpo 1 (X) ampliado



Fonte: O autor, 2014.

Fazendo os cálculos com os valores encontrado da variação do $\Delta t = t_2 - t_1 = -2,8701 \times 10^{-4} - (-3,7712 \times 10^{-4}) = 0,9001 \times 10^{-4}$, ou seja, $90 \mu\text{s}$.

Calculando a velocidade de acordo com o procedimento A no item 3.4.1, Eq. (13) obtemos uma velocidade da onda da amostra Corpo1 (X) de $C_p = 3200$ m/s.

Lembramos ainda, que esse processo foi feito repetidas vezes para que tivesse uma média da velocidade da onda. Alguns desses resultados podem ser vistos no Apêndice.

A Tabela 4 mostra uma média feita de quatro leituras da amostra Corpo1 (X).

Tabela 4 - Leitura do eco-impacto obtida da amostra Corpo 1 (X)

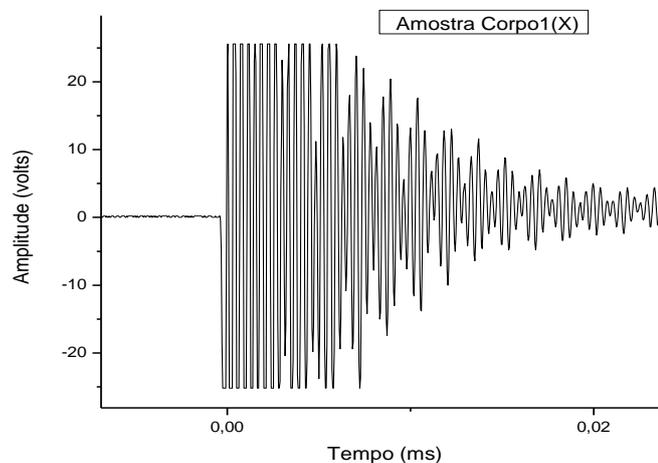
Amostra	Leitura	Veloc. da onda (m/s)	Média da veloc. da onda (m/s)
Corpo1 (X)	1	3032	3233
	2	3200	
	3	3272	
	4	3388	

Fonte: O autor, 2014.

Para estimativa de espessura, utilizamos o procedimento B de acordo com a norma ASTM C1383-98.

A Figura 25 esta representada o gráfico no domínio de tempo em forma de ondas da amostra Corpo1 (X).

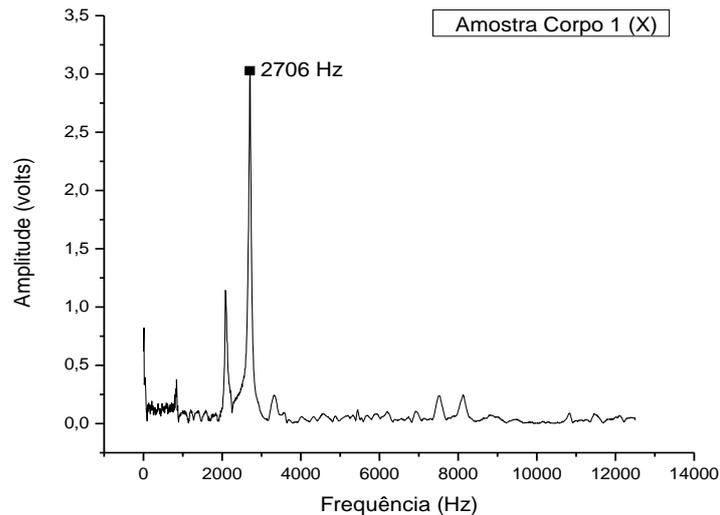
Figura 25 - Gráfico obtido do eco-impacto da amostra Corpo1 (X) com forme a norma ASTM C 1383 do procedimento B



Fonte: O autor, 2014.

Aplicando Transformada Rápida de Fourier (FFT) do gráfico da Figura 25, de modo a obtermos uma frequência dominante da espessura de amostra Corpo1 (X), obtemos um espectro de frequência como ilustra o gráfico da Figura 26.

Figura 26 - Espectro obtido do gráfico da Figura 25 depois de Transformada Rápida de Fourier para ondas no domínio da frequência.



Fonte: O autor, 2014.

Utilizando a velocidade da onda da amostra Corpo1 (X), Tabela 4, tomando como média para $C_p = 3233$ m/s, e usando a frequência fundamental obtido no procedimento B, gráfico da Figura 26, a espessura da amostra Corpo1 (X) é estimada utilizando a Eq. (11), então temos:

$$T = \frac{3233 \text{ m/s}}{2 \cdot 2706.1 / \text{s}} = 0,597 \text{ m}$$

Com o valor médio da velocidade da onda (Tabela 4), foi possível determinar a espessura por meio da frequência dominante, ou seja, uma espessura estimada de 0,597m. Onde a espessura real da peça era de 0,6 m com isso, foi estimado um erro de 0,5% da espessura real.

3.2 Amostra Corpo1 (+)

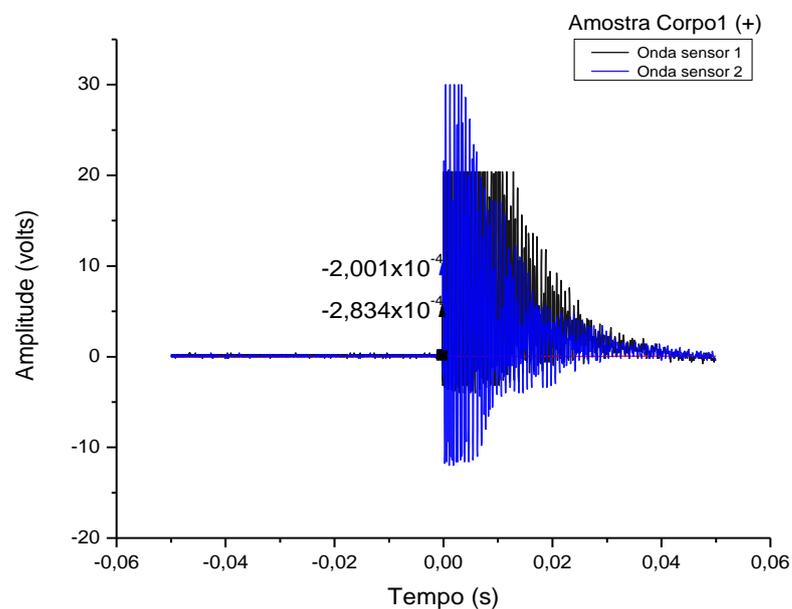
A amostra Corpo1 (+) tem a mesma dimensão da amostra Corpo1 (X), porém, foi adicionado um tipo de agrado (brita), na sua composição.

De agora em diante mencionaremos as amostra com essa composição de amostra Corpo n (+), onde (n), se refere o número de amostras.

Na amostra Corpo1 (+), foi usado o mesmo procedimento decorrido da leitura feita na amostra Corpo1 (X). Os transdutores separados a uma distância de 0,3m, a distância do impacto a transdutor1 (sensor) de 15 cm como recomenda a norma (ASTMC1383, 1998).

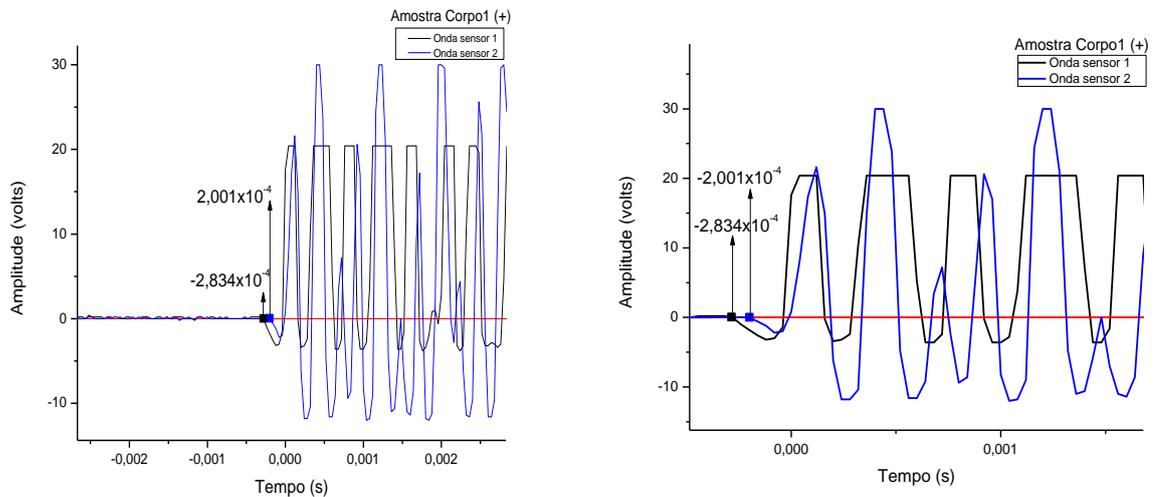
A seguir está representado o gráfico obtido para estimar a velocidade da onda de amostra Corpo1 (+) com eco-impacto, lembrando que para uma melhor visualização do gráfico, de forma a ter uma resposta da variação de tempo da chegada das ondas entre os sensores, foram feitas ampliações em dois estágios do mesmo.

Figura 27 - Gráfico obtido das ondas com Eco-Impacto para obtenção velocidade a partir da variação do tempo da amostra Corpo1 (+)



Fonte: O autor, 2014.

Figura 28 - Obtenção de velocidade a partir da variação do tempo de propagação de ondas de amostra Corpo1 (+)



Nota: O Gráfico da Figura 22 foi ampliado para uma melhor visualização da variação de propagação de onda.

Fonte: O autor, 2014.

No gráfico da Figura 28 que foi ampliado da Figura 27, observa-se que $\Delta t = t_2 - t_1 = -2,001 \times 10^{-4} - (-2,834 \times 10^{-4}) = 0,833 \times 10^{-4}$, ou seja, um tempo de 83,3 μ s.

Utilizando a Eq. (13), a velocidade da onda é obtida multiplicada por 0,96, assim temos $C_p = 3457$ m/s. Alguns desses resultados referentes a amostra, podem ser encontrados no Apêndice desse trabalho.

A Tabela 5, representa uma média de cálculos de velocidades de ondas encontrada pela análise do eco-impacto da amostra Corpo1 (+).

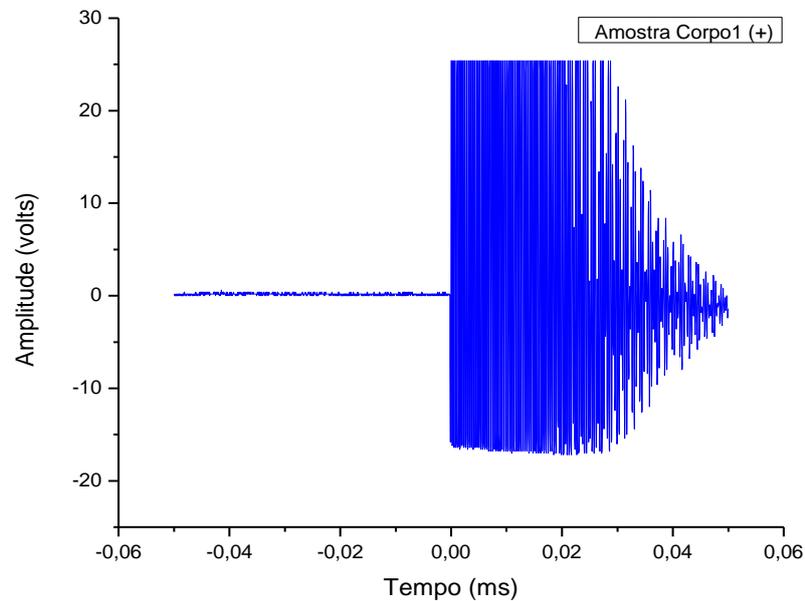
Tabela 5 - Leitura do eco-impacto obtida da amostra Corpo 1 (+)

Amostra	Leitura	Veloc. da onda (m/s)	Média da veloc. da onda (m/s)
Corpo1 (+)	1	3349	3449
	2	3457	
	3	3388	
	4	3600	

Fonte: O autor, 2014.

Para estimar a espessura da amostra Corpo1 (+), utilizou-se o procedimento B conforme a norma (ASTMC1383, 1998), onde obteve o gráfico da Figura 29.

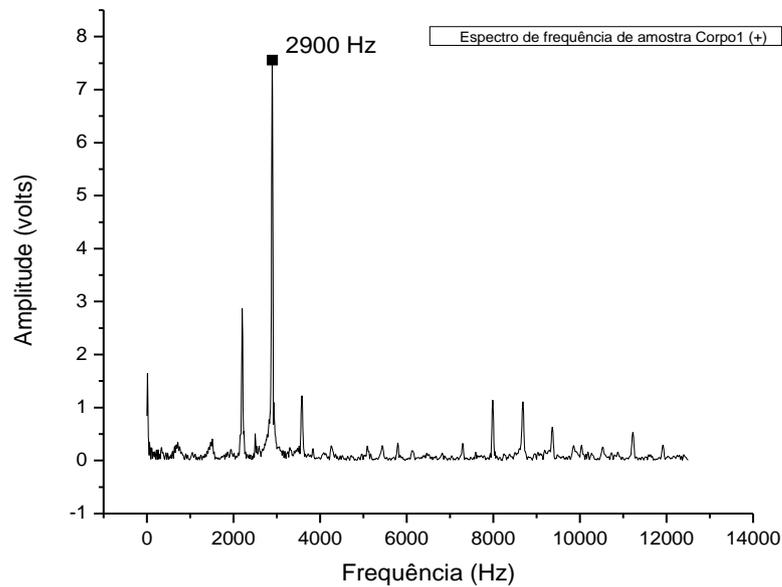
Figura 29 - Gráfico no domínio do tempo obtido do eco-impacto da amostra Corpo1 (+) com forme a norma ASTM C 1383 do procedimento B



Fonte: O autor, 2014.

Transformando, o gráfico da Figura 29 no domínio do tempo para domínio de frequência (FFT), obtemos o gráfico da Figura 30 com uma frequência fundamental da espessura de 2900 Hz.

Figura 30 - Espectro obtido depois da transformação das ondas para domínio da frequência



Fonte: O autor, 2014.

Utilizando o valor médio da velocidade da onda na Tabela 5, foi possível estimar a espessura com a obtenção da frequência fundamental da amostra Corpo1 (+) utilizando a Eq.(11), temos:

$$T = \frac{3449 \text{ m/s}}{2 \times 2900.1 / \text{s}} = 0,595\text{m}$$

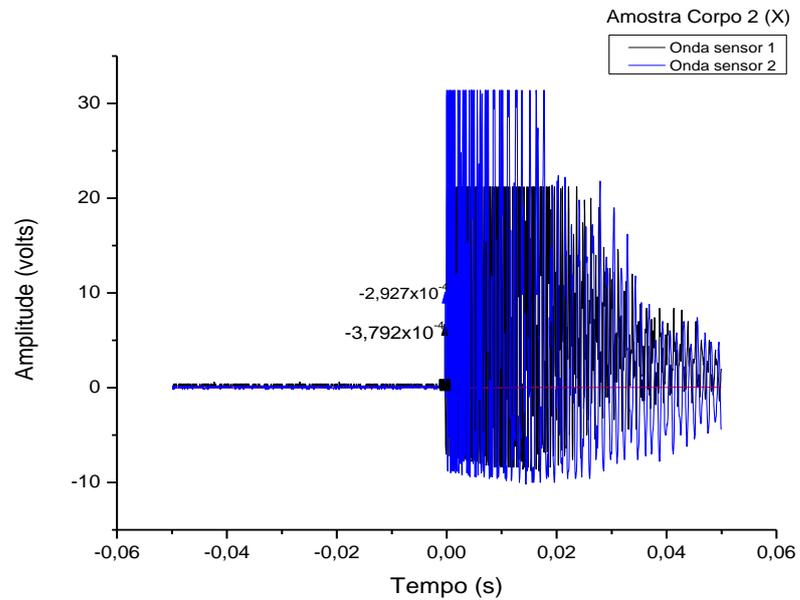
Verificou-se que a amostra Corpo1 (+), por ter tido adicionado agregados, teve um velocidade de onda e a frequência fundamental maior em relação a Corpo1 (X), ou seja, sem brita. A espessura foi estimada de 0,595 m apresentando um erro de 0,8% com relação a espessura real que era de 0,6 m.

3.3 Amostra Corpo2 (X)

Para amostra Corpo2 (X), foi utilizado o mesmo procedimento do item 3.2, onde primeiramente fez-se a leitura da onda pelo procedimento A e no segundo momento pelo procedimento B para obtenção da onda no domínio do tempo para que tivesse uma frequência fundamental da amostra através da Transformação Rápida de Fourier (FFT).

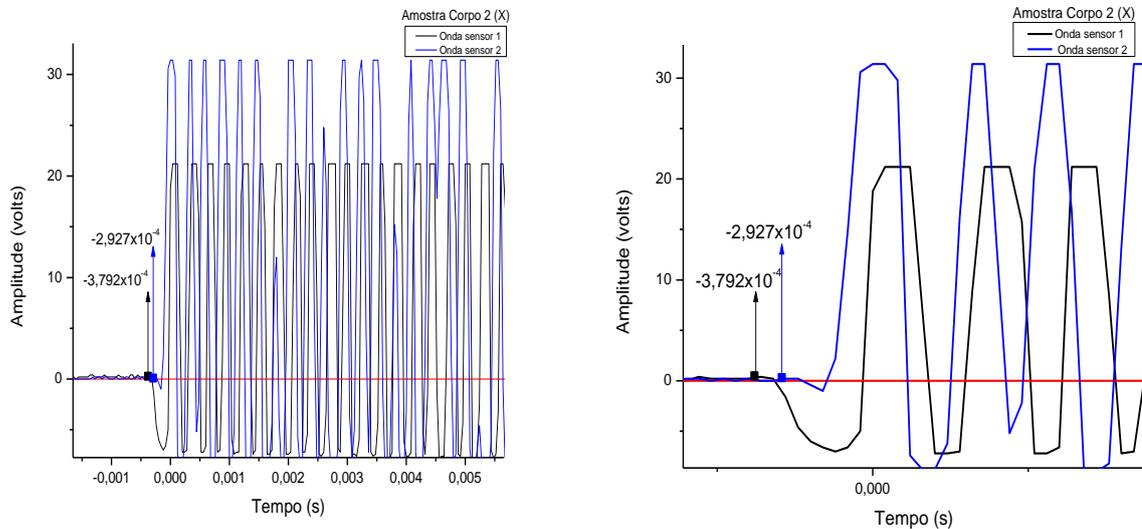
A seguir são apresentados os gráficos e os cálculos obtidos através da amostra Corpo2 (X).

Figura 31 - Gráfico para obtenção de velocidade da onda de amostra Corpo2 (X)



Fonte: O autor, 2014.

Figura 32 - Obtenção de velocidade a partir da variação do tempo de propagação de ondas de amostra Corpo2 (X)



Nota: Gráfico da Figura 31 foi ampliado para uma melhor visualização da variação do tempo de propagação.
 Fonte: O autor, 2014.

A partir do gráfico da Figura 32, percebe-se que o $\Delta t = t_2 - t_1 = -2,927 \times 10^{-4} - (-3,792 \times 10^{-4}) = 0,865 \times 10^{-4}$, ou seja, um tempo de 86,5 μs .

Uma vez com obtido Δt , utilizando a Eq.(13), como recomenda a norma ASTM C1383-98, velocidade de onda é estimada em $C_p = 3310$ m/s.

Na Tabela 6 mostra uma média de velocidade de onda obtida da amostra Corpo2 (X). Alguns desses resultados referente a amostra, podem ser encontrados no Apêndice.

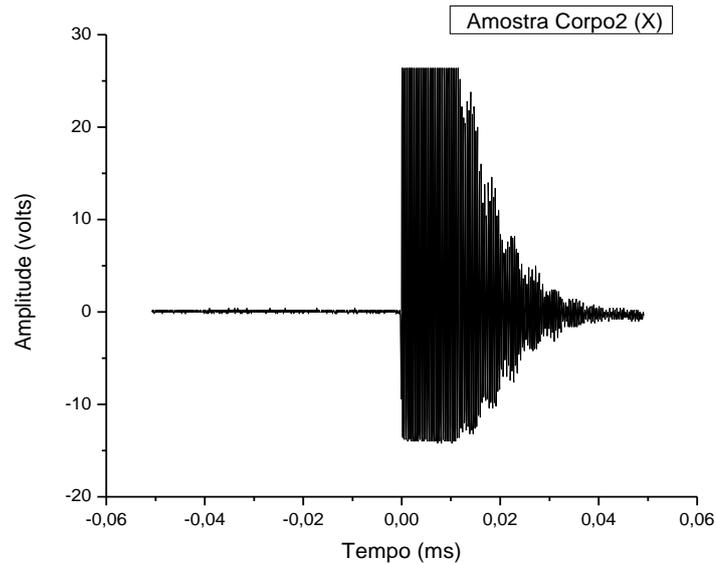
Tabela 6 - Leitura do eco-impacto obtida da amostra Corpo 2 (X).

Amostra	Leitura	Veloc. da onda (m/s)	Média da veloc. da onda (m/s)
Corpo2 (X)	1	3461	3340
	2	3310	
	3	3388	
	4	3200	

Fonte: O autor, 2014.

Com a velocidade de onda obtida, fez-se a leitura do eco-impacto pelo procedimento B de forma a ter uma onda de frequência fundamental da amostra Corpo2 (X) como mostra o gráfico da Figura 33.

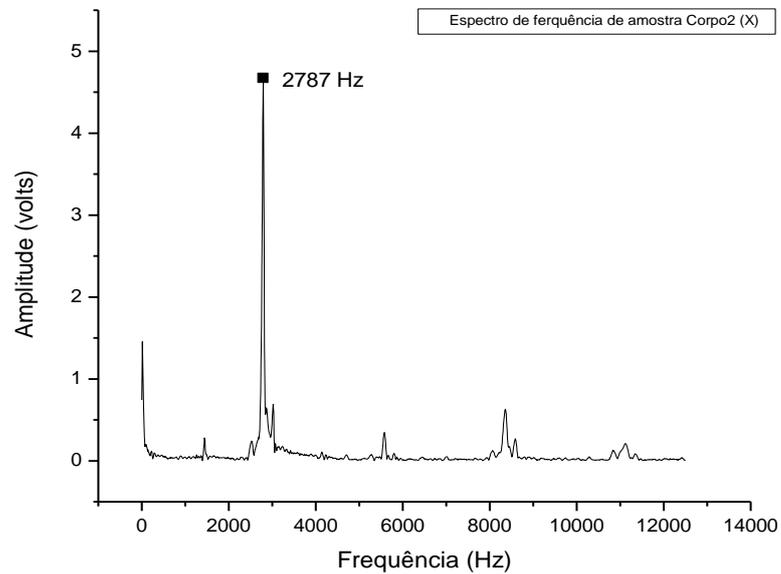
Figura 33 - Gráfico no domínio do tempo obtido do eco-impacto da amostra Corpo2 (X) com forme a norma ASTM C 1383 do procedimento B



Fonte: O autor, 2014.

O gráfico da Figura 33, com a sua transformação para o domínio de frequência fundamental, originou-se no gráfico da Figura 34 com uma frequência de 2787 Hz.

Figura 34 - Espectro obtido depois da transformação das ondas para domínio da frequência



Fonte: O Autor, 2014.

A espessura foi estimada com os valores obtidos da velocidade de onda e a frequência fundamental da espessura da peça.

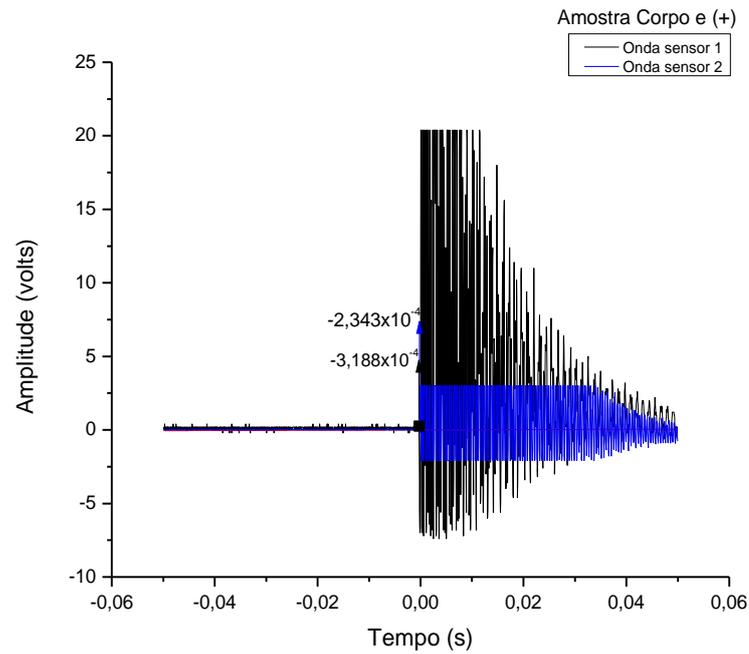
$$T = \frac{3340 \text{ m/s}}{2 \times 2787 \cdot 1/\text{s}} = 0,599 \text{ m}$$

De acordo com o resultado obtido verificou-se que a espessura encontrada apresentou um erro de 0,17% em relação à espessura real que era de 0,598 m.

3.4 Amostra Corpo2 (+)

Seguindo o mesmo procedimento do item 3.3, a velocidade de onda de amostra Corpo 2 (+) foi estimada como é apresentado a seguir, no gráfico da Figura 35, a leitura de velocidade de onda, o tempo de percurso das ondas quando produzido o impacto.

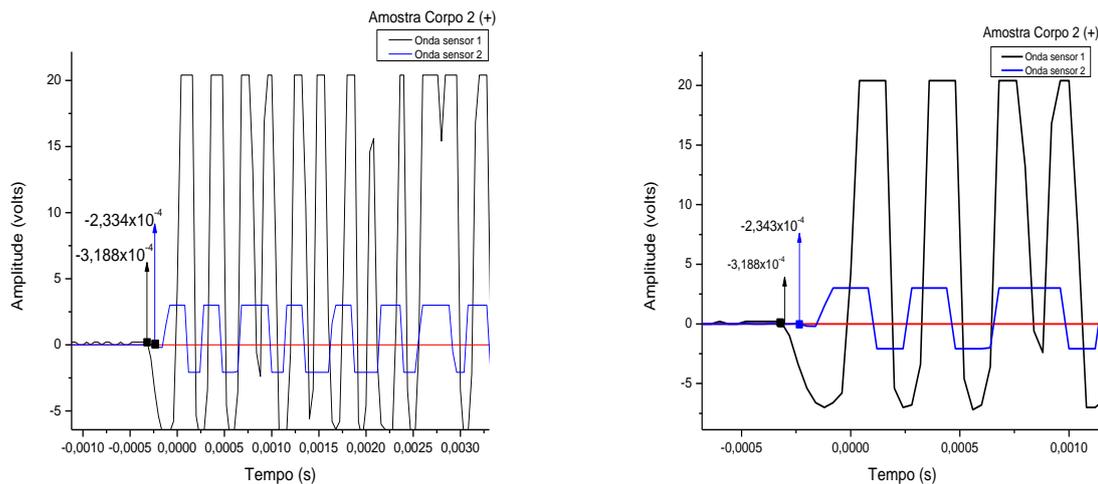
Figura 35 - Gráfico para obtenção de velocidade da onda de amostra Corpo2 (+)



Fonte: O autor, 2014.

O gráfico da Figura 35, teve uma resolução em dois estágios para melhor visualização da variação do tempo entre os sensores.

Figura 36 - Obtenção de velocidade a partir da variação do tempo de propagação de ondas de amostra Corpo2 (+).



Nota: O Gráfico da Figura 35 foi ampliado para uma melhor visualização de propagação de onda, Figura 36.

Fonte: O autor, 2014.

Analisando o gráfico da Figura 36, foi possível obter uma variação de tempo de $\Delta t = t_2 - t_1 = -2,343 \times 10^{-4} - (-3,188 \times 10^{-4}) = 0,845 \times 10^{-4}$, ou seja, $85 \mu\text{s}$. Com esta variação estimou-se a velocidade de onda de acordo com a Eq.(13), em $C_p = 3388 \text{ m/s}$.

A Tabela 7, mostra o resultados de obtenção da velocidade de onda de amostra corpo 2 (+), onde apresenta uma média do mesmo para sua análise.

Algumas dessas análises correspondentes à amostra, também podem ser encontradas no Apêndice.

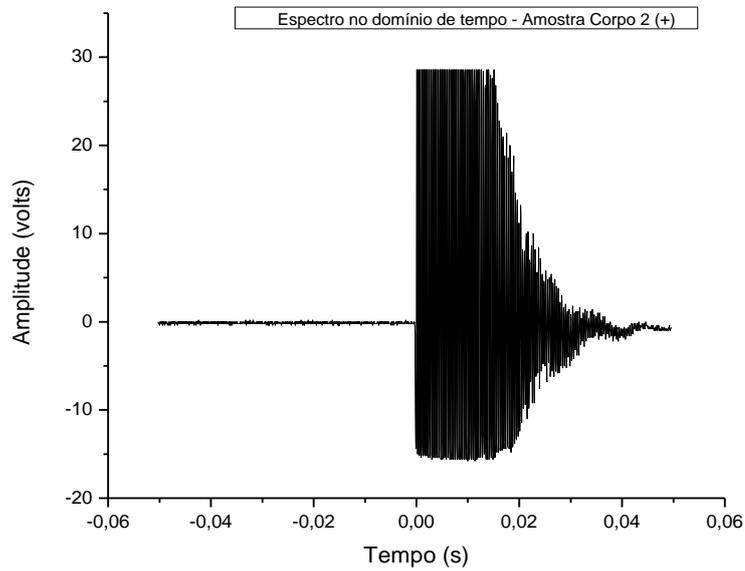
Tabela 7 - Leitura do eco-impacto obtida da amostra Corpo 2 (+)

Amostra	Leitura	Veloc. da onda (m/s)	Média da veloc. da onda (m/s)
Corpo2 (+)	1	3600	3412
	2	3310	
	3	3388	
	4	3349	

Fonte: O autor, 2014.

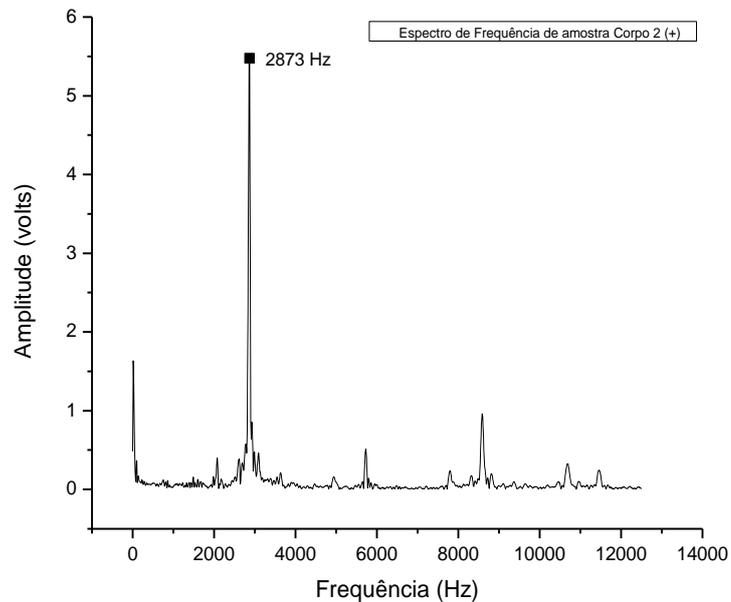
O gráfico da Figura 37 foi obtido através do procedimento B para obtenção da frequência fundamental da amostra Corpo2 (+) por meio do (FFT).

Figura 37 - Gráfico no domínio do tempo obtido do eco-impacto da amostra Corpo2 (+) com forme a norma ASTM C 1383 do procedimento B



Fonte: O autor, 2014.

Figura 38 - Espectro no domínio da frequência, obtido do eco-impacto da amostra Corpo2 (+) com forme a norma ASTM C 1383 do procedimento B



Fonte: O autor, 2014.

Com a frequência fundamental e velocidade obtida, foi possível estimar a espessura da amostra Corpo2 (+).

$$T = \frac{3412 \text{ m/s}}{2 \times 2873.1/\text{s}} = 0,594 \text{ m}$$

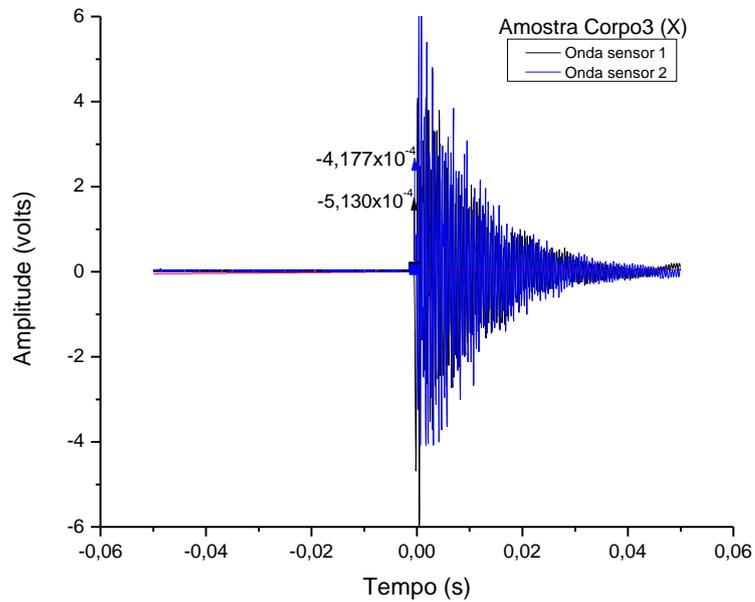
A espessura obtida apresentou um erro de 0,8% em relação à espessura da amostra Corpo 2 (+) que é de 59,9 cm. Podemos verificar também, que amostra Corpo2 (+), teve uma frequência fundamental superior da amostra Corpo2 (X). Isso deve ao fato de adiconamentos de agregados na sua composição de amostra Corpo2 (+).

3.5 Amostra Corpo3(X)

Para amostra Corpo3 (X), foram tomados os mesmos procedimentos do item 3.4, com isso, tivemos os seguintes resultados conforme a seguir.

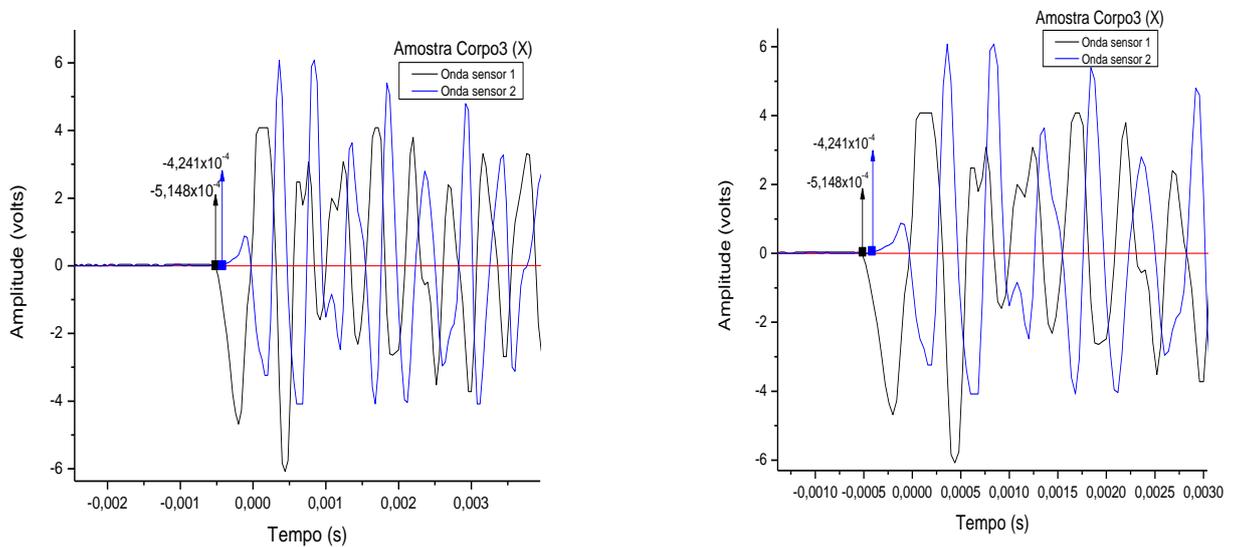
O gráfico da Figura 39, foi obtidos para estimar a velocidade de acordo com a norma ASTM C1383, (1998).

Figura 39 - Gráfico para obtenção de velocidade da onda de amostra Corpo3 (X)



Fonte: O autor, 2014.

Figura 40 - Obtenção de velocidade a partir da variação do tempo de propagação de ondas de amostra Corpo3 (X)



Nota: Para uma melhor visualização da diferença da propagação de onda, o gráfico da Figura 39 foi ampliado.

Fonte: O autor, 2014.

Analisando o gráfico da Figura 40, é possível obter $\Delta t = t_2 - t_1 = -4,241 \times 10^{-4} - (-5,148 \times 10^{-4}) = 0,953 \times 10^{-4}$, ou seja, $91 \mu\text{s}$. Com esta variação estimou-se a velocidade de onda de acordo com a Eq.(13), em $C_p = 3165 \text{ m/s}$.

A Tabela 8 a seguir está representada uma média da velocidade da amostra Corpo3 (X).

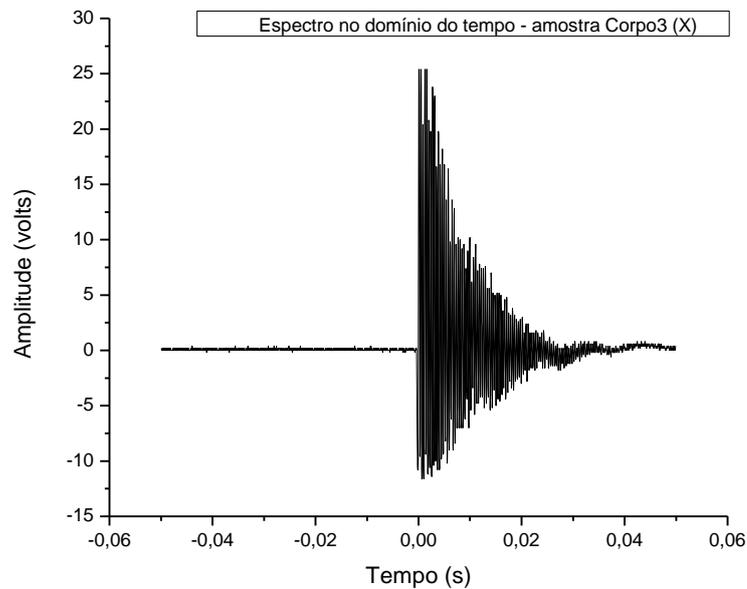
Tabela 8 - Leitura da velocidade obtida da amostra Corpo 3 (X)

Amostra	Leitura	Veloc. da onda (m/s)	Média da veloc. da onda (m/s)
Corpo3 (X)	1	3097	3148
	2	3165	
	3	3130	
	4	3200	

Fonte: O autor, 2014.

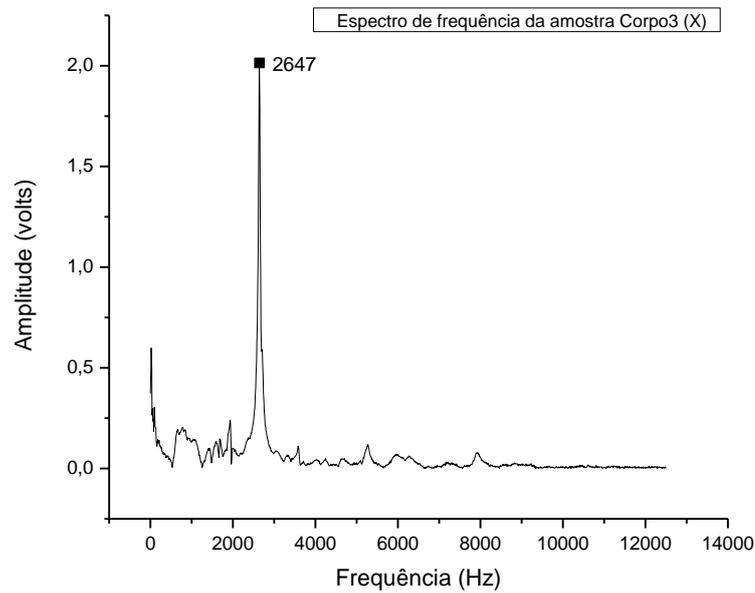
Para determinar a espessura de amostra Corpo 3 (X), foi realizado o ensaio mediante o procedimento B da mesma norma, obtendo como resultado uma frequência fundamental de 2647 Hz, o gráfico correspondente ao ensaio está representado na Figura 52.

Figura 41 - Espectro no domínio do tempo, amostra Corpo 3 (X)



Fonte: O Autor, 2014.

Figura 42 - Espectro no domínio de frequência, amostra Corpo 3 (X)



Fonte: O autor, 2014.

Após a obtenção da frequência fundamental, procede-se a cálculo de estimativa de espessura com a velocidade média obtida na Tabela 8.

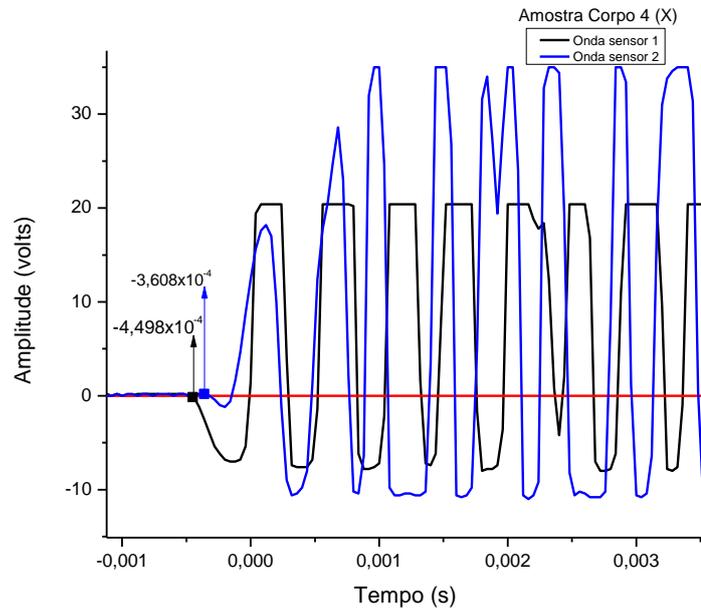
$$T = \frac{3148 \text{ m/s}}{2 \times 2647 \text{ 1/s}} = 0,595 \text{ m}$$

A espessura encontrada, de 0,595m, verificou-se um erro de 0,34% em relação à espessura real da amostra Corpo3 (X) que era de aproximadamente 0,597 m.

3.6 Amostra Corpo4 (X)

Para estimar a velocidade e a espessura da amostra Corpo4 (X), foram utilizados os mesmo procedimentos decorridos no item 3.5. No gráfico da Figura 43, mostra uma variação de propagação de onda ente dois transdutores (Δt) de 89 μ s. Com isso, foi possível obter uma velocidade de 3236 m/s quando utilizado a Eq.(13).

Figura 43 - Gráfico para obtenção de velocidade da onda de amostra Corpo 4 (X)



Fonte: O autor, 2014.

A Tabela 9, mostra a média relativa dos resultados obtidos de amostra Corpo 4 (X) quando procurava-se estimar a velocidade de onda.

No Apêndice, podemos estão representados alguns resultados obtidos referente à amostra Corpo 4 (X).

Tabela 9 - Leitura da velocidade obtida da amostra Corpo 4 (X).

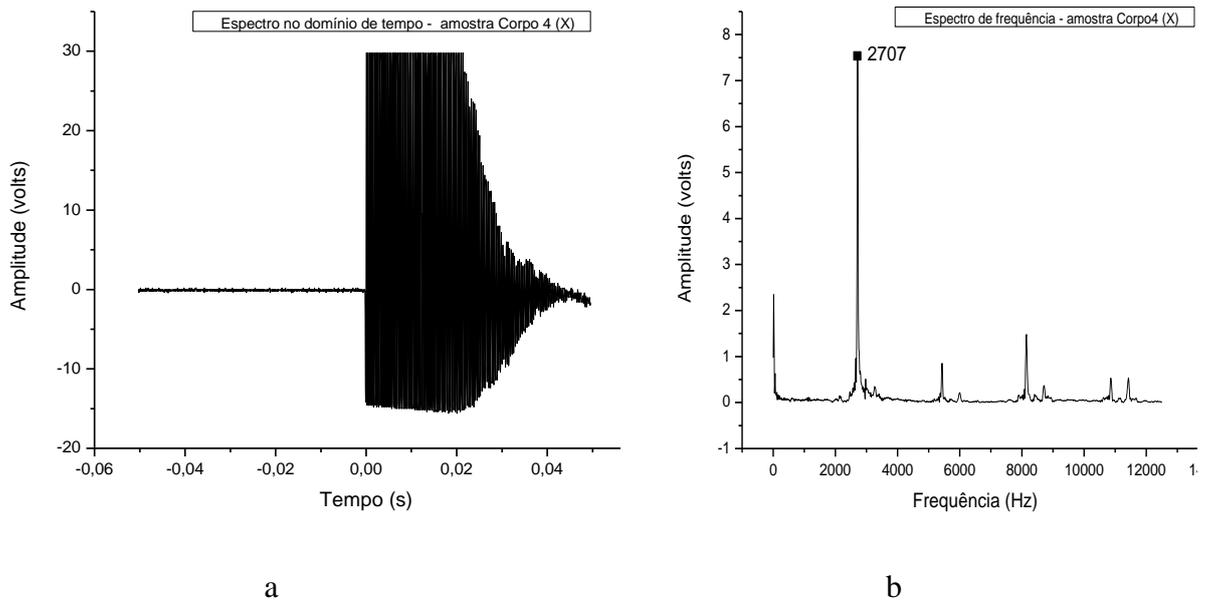
Amostra	Leitura	Veloc. da onda (m/s)	Média da veloc. da onda (m/s)
Corpo 4 (X)	1	3272	3274
	2	3236	
	3	3388	
	4	3200	

Fonte: O autor, 2014.

Uma vez estimado a velocidade da onda, utilizou-se o procedimento B da mesma norma para obter a frequência dominante da amostra Corpo 4 (X). A Figura 44a mostra o

espectro no domínio do tempo, e após o FFT, o espectro no domínio de frequência onde, foi estimada uma frequência de 2707 Hz Figura 44b.

Figura 44 - Espectro no domínio de tempo (a), e no domínio de frequência (b) da amostra Corpo 4 (X)



Fonte: O autor, 2014.

Com essas análises feita foi possível estimar a espessura da amostra Corpo 4 (X) em 0,605 m, quando utilizado a Eq.(11). Desta feita, um erro de 0,8% com relação a espessura rela que era de 0,6 m.

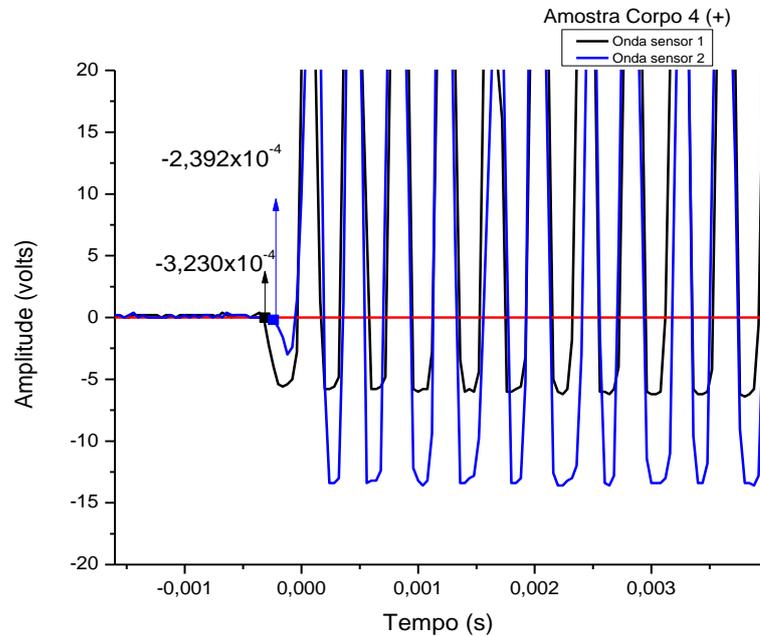
3.7 Amostra Corpo 4 (+)

Um mesmo procedimento foi feito para a amostra Corpo 4 (+) de forma a compará-lo com amostra Corpo 4 (X) visto que, tinham mesma dimensão contudo, a amostra Corpo 4 (+), foi adicionado agregados (brita).

Primeiramente fez-se a leitura da onda pelo procedimento A e no segundo momento pelo procedimento B para obtenção da onda no domínio do tempo para que tivesse uma frequência fundamental da amostra, utilizou-se a técnica de Transformação Rápida de Fourier (FFT).

A seguir esta apresentado um dos gráficos da obtido da variação do tempo (Δt) para obtenção da velocidade de propagação de onda da amostra Corpo 4 (+).

Figura 45 - Gráfico para obtenção de velocidade da onda de amostra Corpo 4 (+)



Fonte: O autor, 2014.

A partir do gráfico obtemos uma variação de tempo (Δt) de $84\mu\text{s}$.

Utilizando Eq.(11), como recomenda a norma ASTM C1383- 98, velocidade de onda é estimada em $C_p = 3429 \text{ m/s}$.

A tabela a seguir mostra uma relação das velocidades obtidas da amostra Corpo 4 (+), onde fez-se uma média das mesma.

Tabela 10 - Leitura da velocidade obtida da amostra Corpo 4 (+)

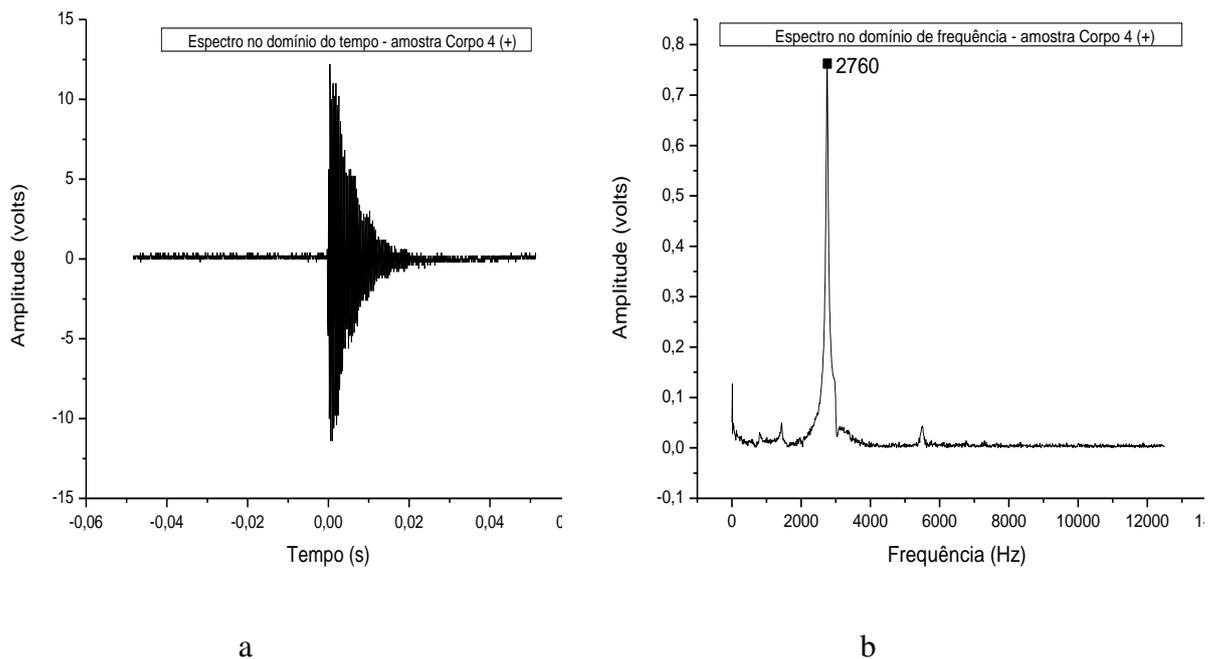
Amostra	Leitura	Veloc. da onda (m/s)	Média da veloc. da onda (m/s)
Corpo4 (+)	1	3273	3338
	2	3449	
	3	3429	
	4	3200	

Fonte: O autor, 2014.

Utilizou-se o procedimento B da mesma norma para obter a frequência dominante da amostra Corpo 4 (+).

A Figura 46a mostra o espectro no domínio do tempo, e após o FFT, o espectro no domínio de frequência com uma frequência dominante de 2760 Hz Figura 46b.

Figura 46 - Espectro no domínio de tempo (a), e no domínio de frequência (b) da amostra Corpo 4 (X)



Fonte: O autor, 2014.

Com essas análises feita, estima-se a espessura da amostra Corpo 4 (+) quando utilizado a Eq.(11):

$$T = \frac{3338 \text{ m/s}}{2 \times 2760 \text{ 1/s}} = 0,604 \text{ m}$$

As análises mostram que amostra Corpo 4 (+), apresentou uma velocidade de onda de 3338 m/s que é maior do a amostra sem agregado (Corpo 4 (X)) e conseqüentemente a uma frequência dominante de 2760 Hz, que por sinal, também maior do a amostra sem adicionamento.

Desta feita, a espessura estimada foi de 0,604 m quando utilizado a Eq.(11). O erro estimado foi de 0,8% em relação a espessura real que era de 0,6 m.

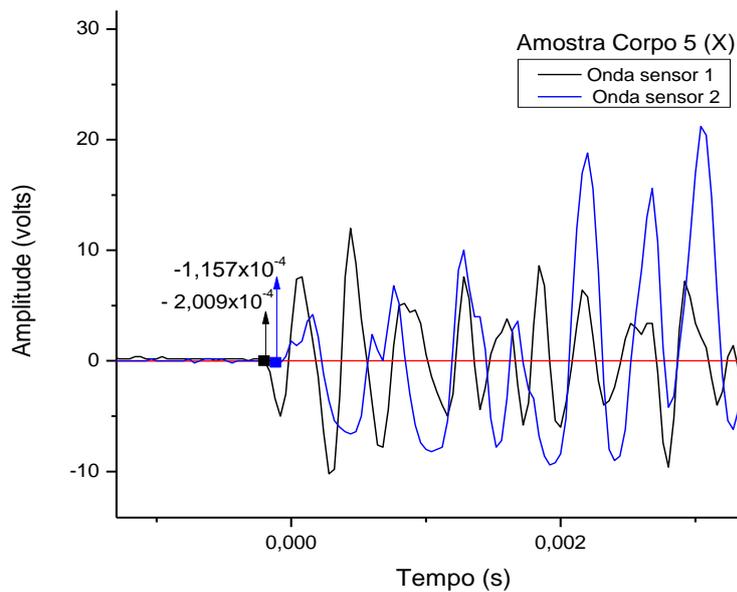
Estes cálculos e demonstrações gráficas estão registrados no anexo B.

3.8 Amostra Corpo 5 (X)

A Figura 47 mostra um dos resultados do ensaio da amostra Corpo 5 (X).

Adotando apenas o procedimento A da ASTM C 1383-98, obtemos os valores exposto na Tabela 11 para estimar a velocidade de propagação de ondas de acordo com a Eq. (13). Com isso, foi possível obter uma variação de tempo entre os transdutores de $85,2 \mu\text{s}$, de forma a estimar a velocidade de propagação de onda de 3380 m/s .

Figura 47 - Gráfico para obtenção de velocidade de propagação da onda de amostra Corpo 5 (X)



Fonte: O autor, 2014.

Tabela 11 - Leitura da velocidade de propagação de onda obtida da amostra Corpo 5 (X)

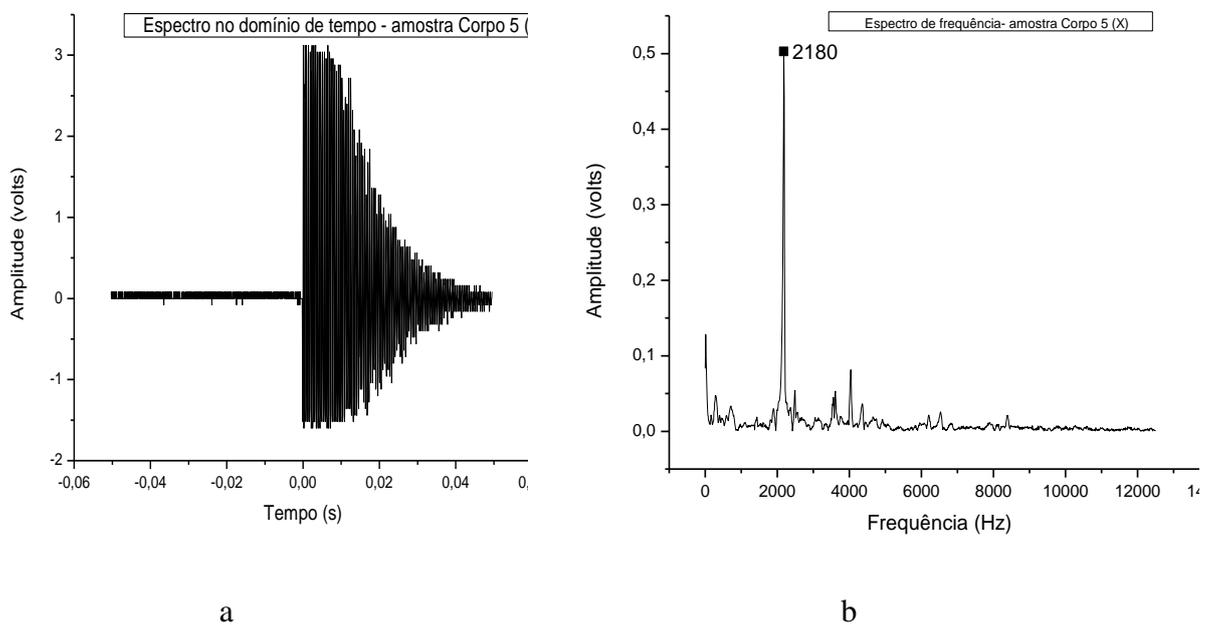
Amostra	Leitura	Veloc. da onda (m/s)	Média da veloc. da onda (m/s)
Corpo 5 (X)	1	3273	3327
	2	3380	
	3	3388	
	4	3268	

Fonte: O autor, 2014.

Seguindo o mesmo contexto de análises feito em seções anteriores, temos então, como o procedimento B da ASTM C 1383-98, para estimativa de espessura.

A Figura 48a, está representado os gráfico no do domínio do tempo e após a FFT, uma frequência dominante de 2180 Hz é registrada Figura 48b.

Figura 48 - Espectro no domínio de tempo (a), e no domínio de frequência (b) da amostra Corpo 5 (X)



Fonte: O autor, 2014.

Com os dados obtidos, foi possível estimar a espessura da amostra Corpo 5 (X).

$$T = \frac{3327 \text{ m/s}}{2 \times 2180 \text{ 1/s}} = 0,763 \text{ m}$$

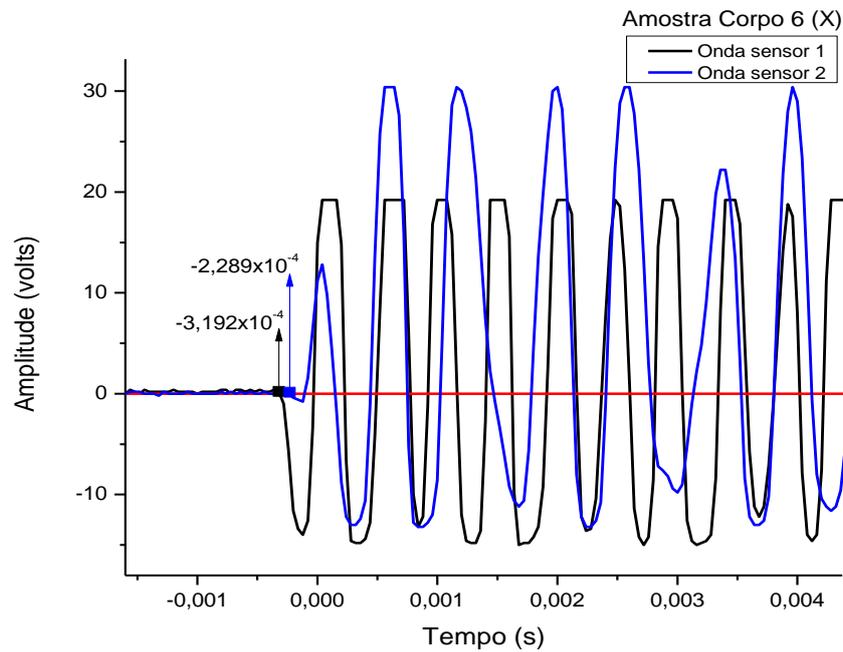
O valor obtido de 0,763m representa um erro de 0,4% em relação a espessura real da amostra Corpo 5 (X) que era de 0,766m.

3.9 Amostra Corpo 6 (X)

Para estimar a velocidade da amostra Corpo 6 (X), foi utilizado o mesmo procedimento adotado na leitura da amostra Corpo 5 (X) em que utilizam-se dois transdutores a uma distância de 0,3m. A esfera de aço de 8 mm utilizado para produzir o impacto a uma distância 0,15m do primeiro transdutor ou seja, como prescreve o procedimento A da ASTM C1383, (1998).

A Figura 49 mostra um dos resultados obtidos da variação de tempo (Δt) para estimativa de propagação de velocidade onda da amostra Corpo 6 (X).

Figura 49 - Gráfico para obtenção de velocidade de propagação da onda de amostra Corpo 6 (X)



Fonte: O autor, 2014.

O gráfico da Figura 49 nos dá uma variação de tempo (Δt) de 90,3 μs , tendo assim, uma estimativa de propagação de velocidade de onda de 3189 m/s quando utilizado a Eq.(13).

Na Tabela 12 está apresentado um resumo das velocidades obtidas onde se fez média das velocidades obtidas.

Tabela 12 - Leitura da velocidade de propagação de onda obtida da amostra Corpo 6 (X)

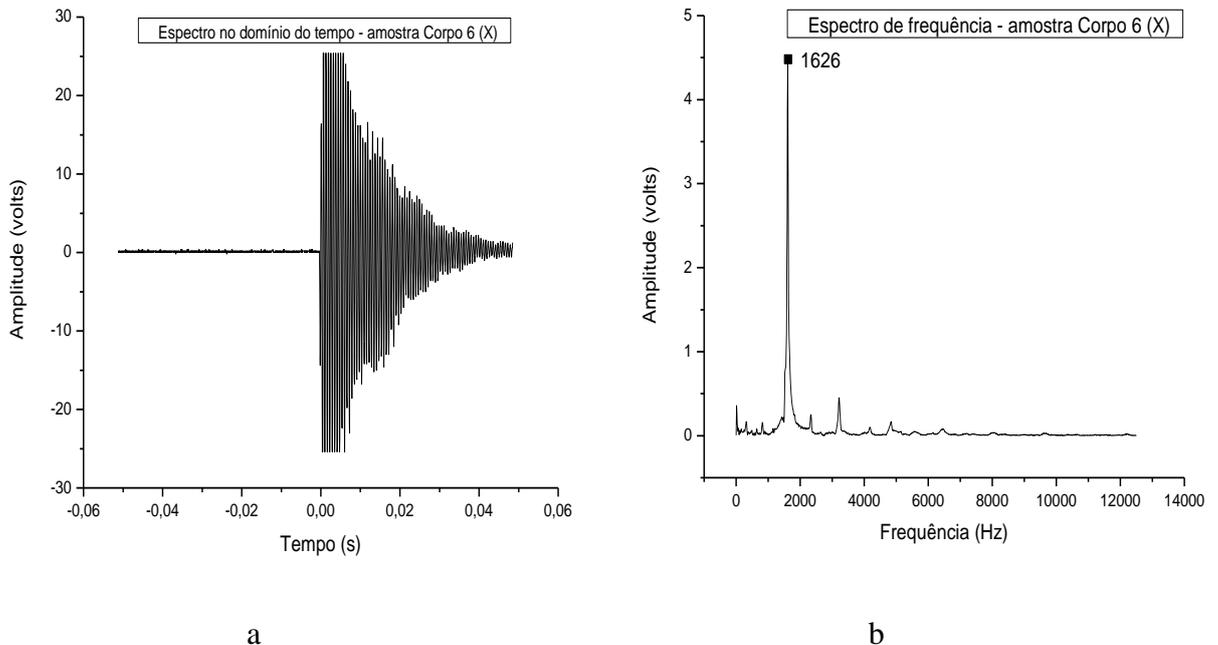
Amostra	Leitura	Veloc. da onda (m/s)	Média da veloc. da onda (m/s)
Corpo 6 (X)	1	3272	3254
	2	3189	
	3	3388	
	4	3165	

Fonte: O autor, 2014.

Para estimativa da frequência dominante da amostra Corpo 6 (X), foi utilizado o procedimento B da mesma norma.

A Figura 50a, está representado o gráfico no do domínio do tempo e após a FFT, uma frequência dominante de 1626 Hz Figura 50b.

Figura 50 - Espectro no domínio de tempo (a), e no domínio de frequência (b) da amostra Corpo 6 (X)



.Fonte: O autor, 2014.

Com os valores obtidos nos dois procedimentos, a velocidade da onda $C_p = 3254$ m/s e frequência dominante $f = 1626$ Hz, a espessura da amostra Corpo 6 (X) foi estimada:

$$T = \frac{3254 \text{ m/s}}{2 \times 1626 \times 1/\text{s}} = 1,001 \text{ m}$$

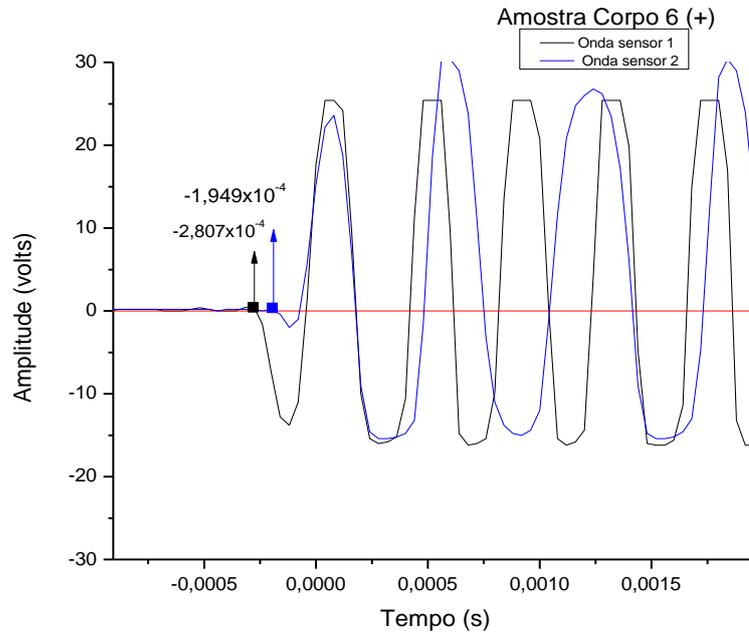
O valor encontrado representa um erro de 0,1% em relação a espessura real que era de 1 m.

3.10 Amostra Corpo 6 (+)

Utilizando o mesmo procedimento da amostra Corpo 6 (X), na estimativa da velocidade de onda, foi obtido uma variação de tempo para amostra Corpo 6 (+) de 85,8 μ s.

Com isso, foi possível estimar uma velocidade de propagação de onda de 3349 m/s quando utilizado a Eq.(13) como pode ser observado na Figura 51.

Figura 51 - Gráfico para obtenção de velocidade de propagação da onda de amostra Corpo 6 (+)



Fonte: O autor, 2014.

A Tabela 13 mostra um resumo das velocidades da onda obtido da amostra Corpo 6 (+), de forma a ter uma média do mesmo.

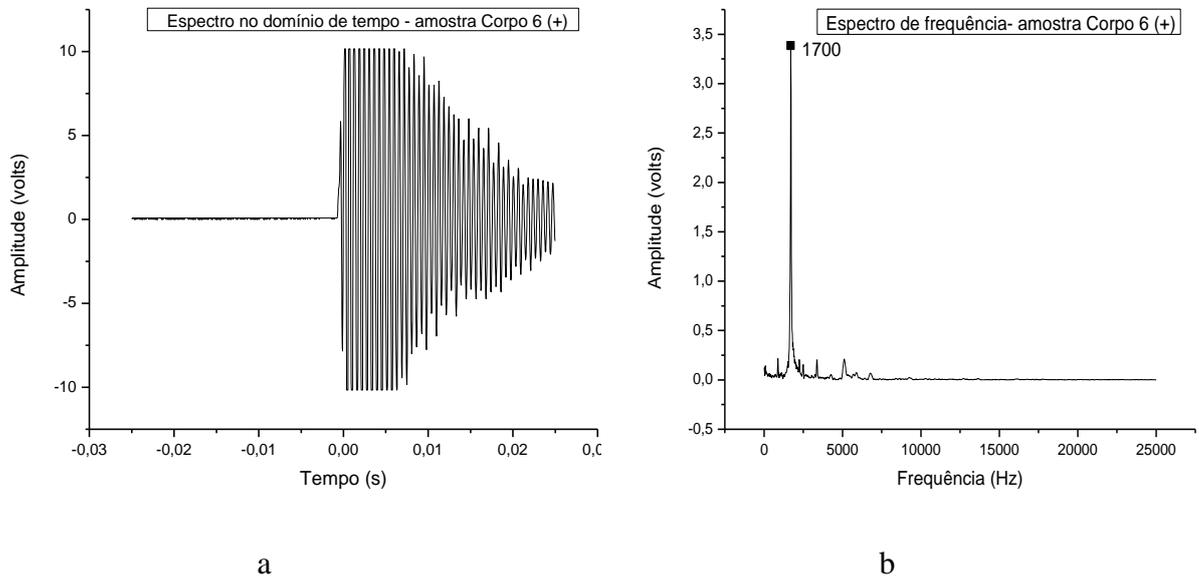
Tabela 13 - Leitura da velocidade de propagação de onda obtida da amostra Corpo 6 (+)

Amostra	Leitura	Veloc. da onda (m/s)	Média da veloc. da onda (m/s)
Corpo 6 (+)	1	3429	3385
	2	3349	
	3	3388	
	4	3273	

Fonte: O autor, 2014.

Realizando a análise para obtenção da frequência fundamental para estimativa da espessura conforme utilizado no item 4.1.8, obtemos uma frequência de 1700 Hz após o FFT, ver Figura 52.

Figura 52 - Espectro no domínio de tempo (a), e no domínio de frequência (b) da amostra Corpo 6 (+)



Fonte: O autor, 2014.

Com os valores obtidos nos dois procedimentos, a velocidade da onda $C_p = 3385$ m/s e frequência dominante $f = 1700$ Hz, a espessura da amostra Corpo 6 (+) foi estimada:

$$T = \frac{3385 \text{ m/s}}{2 \times 1700 \times 1/\text{s}} = 0,996 \text{ m}$$

O valor encontrado representa um erro de 0,4% em relação à espessura real que era de 1 m.

3.11 Comparação de análises dos resultados obtidos

3.11.1 Comparando as velocidades de propagação de onda

Na Tabela 14 está representado um resumo das velocidades de propagação de ondas que foram obtidas de todas as amostras mediante os procedimentos para obtenção dos mesmos.

Tabela 14 - Comparação da velocidade de propagação entre as amostras com agregados (+) e sem agregados (X)

Amostra	Velocidade de ondas (m/s)	
	Sem agregados (X)	Com agregados (+)
Corpo 1	3233	3449
Corpo 2	3340	3412
Corpo 3	3148	—
Corpo 4	3327	3338
Corpo 5	3327	—
Corpo 6	3254	3385

Fonte: O autor, 2014.

Os resultados obtidos na Tabela 14, ilustram a variação da velocidade das ondas entre as amostras com e sem agregados. Isso se deve pelo fato de que os agregados têm módulos de elasticidade maior, e, portanto, maior velocidade de propagação da onda do que na pasta de cimento.

Desta forma, um concreto que possua uma maior quantidade de agregado apresenta maior velocidade (CHUNG & LAW, 1983 *apud* PÉREZ, 2009).

3.11.2 Comparação entre frequência dominante

Na Tabela 15 está representado um resumo das frequências dominante que foi obtido de todas as amostras mediante os procedimentos para obtenção dos mesmos.

Tabela 15 - Comparação da frequência dominante entre as amostras com agregados (+) e sem agregados (X)

Amostra	Frequência (Hz)	
	Sem agregados (X)	Com agregados (+)
Corpo 1	2706	2900
Corpo 2	2787	2873
Corpo 3	2647	—
Corpo 4	2707	2760
Corpo 5	2180	—
Corpo 6	1626	1700

Fonte: O autor, 2014.

A Tabela 15, ilustra diferença das frequências dominantes das amostras com e sem agregados. Conforme visto no item 3.11.1, a utilização de agregados nas amostras interfere na velocidade da onda.

O detalhamento dos resultados da variação de velocidade das ondas e frequências dominantes mediante a utilização de diferentes agregados, contidos em estudos realizados por alguns pesquisadores, pode ser visualizado no Anexo A, como complementação para desenvolvimento deste trabalho.

3.11.3 Confronto da velocidade obtida pelo Procedimento A e B da norma ASTM C 1383-98

Estimar a velocidade para obtenção da espessura de espessura da amostra era um dos nossos objetivos.

Desta feita, a nossa motivação é ter como incógnita a espessura, por esta razão tomamos como o procedimento A da norma ASTM C 1383- 98 para estimativa da velocidade como citado no item 2.1.3.1.

A velocidade de propagação da onda obtida pelo procedimento B da ASTM C 1383-98, ou seja, através da frequência dominante, demonstrou ser mais fácil para obtenção das leituras, porém, é necessário o parâmetro da amostra (a espessura).

Essas velocidades de propagação de ondas também foram estimadas durante os estudos, embora neste trabalho não está registrado, pois, como mencionado no parágrafo anterior, o nosso foco era estimar a espessura e não tê-la para estimar outro parâmetro.

Deixamos como exercício, estimar a velocidade de propagação de ondas por meio do procedimento B da mesma norma utilizando a Tabela 15 e a referida espessura de cada amostra utilizando a Eq.(11).

Ao estimar essas espessuras, torna-se possível visualizar que os resultados obtidos para obtenção da velocidade da onda por meio do procedimento B são em sua maioria, maiores que os obtidos através do procedimento A. Isso acontece, porque, a velocidade da onda obtida pelo procedimento B é originada da propagação da onda no corpo inteiro da amostra, caso esta não possua fissuras, ao passo que em A, a onda percorre de maneira superficial em relação à amostra.

A seguir podemos ver uma relação de forma de esclarecimento dessa variação entre a velocidade estimada pelo os dois procedimentos.

Sejam V_A e V_B as velocidades calculadas pelo procedimento A e B da norma ASTM C 1383-98, a Tabela 16 e Tabela 17 mostram os resultados obtidos nos experimentos realizados para obtenção da velocidade da onda utilizando amostras sem agregados e com agregados, respectivamente, trazendo o cômputo do erro estimado entre as velocidades mensuradas nos dois procedimentos.

Tabela 16 - Cálculo da velocidade da onda utilizando procedimento A e B em amostras sem agregados

Amostra	Velocidade da onda sem agregados		
	V_A (m/s)	V_B (m/s)	Erro (%)
Corpo 1	3233	3247	0,43
Corpo 2	3340	3339	0,03
Corpo 3	3148	3161	0,41
Corpo 4	3274	3248	0,80
Corpo 5	3327	3340	0,39
Corpo 6	3254	3252	0,06

Tabela 17 - Cálculo da velocidade da onda utilizando procedimento A e B em amostras com agregados.

Amostra	Velocidade da onda com agregados		
	V_A (m/s)	V_B (m/s)	Erro (%)
Corpo 1	3449	3480	0,89
Corpo 2	3412	3442	0,87
Corpo 3	--	--	--
Corpo 4	3338	3312	0,79
Corpo 5	--	--	--
Corpo 6	3385	3400	0,44

Essa variação entre as velocidades de ondas obtidas nos dois métodos não apontam características relevantes que impactem nos resultados esperados como, por exemplo, estimar a espessura da amostra.

Os resultados obtidos com eco-impacto são precisos, como podem observar na Tabela 18. De todas as análises feitas das amostras sem agregados, o equipamento utilizado apresentou um erro de 0,39% na estimativa das espessuras. Já para as amostra com agregados, o erro é de 0,64% como mostra a Tabela 19.

Tabela 18- Relação das análises das amostras sem agregados

Amostra	Análises de amostras sem agregados				
	Média da velocidade da onda (m/s)	Frequência dominante (Hz)	Espessura real (m)	Espessura estimada (m)	Erro relativo (%)
Corpo 1	3233	2706	0,6	0,597	0,50
Corpo 2	3340	2787	0,598	0,599	0,17
Corpo 3	3148	2647	0,597	0,595	0,34
Corpo 4	3274	2707	0,6	0,605	0,83
Corpo 5	3327	2180	0,766	0,763	0,39
Corpo 6	3254	1626	1	1,001	0,10
Média					0,39

Fonte: O autor, 2014.

Tabela 19 - Relação das análises das amostras com agregados

Amostra	Análises de amostras com agregados (+)				
	Média da velocidade da onda (m/s)	Frequência dominante (Hz)	Espessura real (m)	Espessura estimada (m)	Erro relativo (%)
Corpo 1	3449	2900	0,6	0,595	0,83
Corpo 2	3412	2873	0,598	0,594	0,67
Corpo 3	-	-	-	-	-
Corpo 4	3338	2760	0,6	0,604	0,67
Corpo 5	-	-	-	-	-
Corpo 6	3385	1700	1	0,996	0,40
Média					0,64

Fonte: O autor, 2014.

3.12 Validação do equipamento e melhorias

O sistema desenvolvido no laboratório, ainda que simples e de baixo custo, mostrou ser eficaz, pois, os objetivos propostos como, obtenção de ondas característicos, correlação nos dados de forma a estimar as espessuras das amostras, foram alcançados com efetividade. Embora houvesse certas limitações na leitura das ondas por parte dos sensores utilizados (microfone de eletreto e buzzer piezo), as faixas úteis de resposta do sensor, garantiu a leituras de ondas de acordo com sua capacidade, suficiente para avaliação do que foi proposto neste estudo.

A Tabela 20 ilustra uma especificação da faixa útil do sensor que foram utilizados para realização dos experimentos.

Tabela 20 - Especificação do sensor utilizado no experimento

ESPECIFICAÇÃO		
Parâmetros	Valores	Unidades
Frequência resposta	2.600 ± 300	Hz
Impedância ressonância	250	Ohm
Capacitância 1kHz	50,000 ± 30%	pF
Placa do material	Bronze	—
Temperatura de operação	-20 ~ +60	° C
Temperatura de armazenamento	-20 ~ +70	° C

Fonte: Digi-key Corporation. Disponível em: <<http://www.digikey.ca/product-detail/en/AB3529BF/668-1016-ND/1464755>>. Acesso em: 10 nov. 2013.

Com esses parâmetros especificado na Tabela 20 foi possível verificar total inviabilidade na estimativa da espessura de amostras cujas dimensões fossem abaixo dos 50 cm, já que a faixa útil do sensor utilizado estava restrita até 2900Hz.

Por este fato, a limitação da leitura dos sensores, aponta-nos para sugestões de diversificação de sensores com maior capacidade de leitura, estando acima de 2900 Hz, aumentando assim as possibilidades de análise de amostras com espessuras menores.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta os resultados do programa experimental desenvolvido no Laboratório de Ensaios Físicos do Instituto Politécnico do Rio de Janeiro (IPRJ/UERJ), que envolveu 10 tipos de amostras de concreto feitos com materiais disponíveis na mesma Instituição. Nesses corpos de prova, avaliamos as principais variáveis que poderiam influenciar nos parâmetros para efetivação do método utilizado como, obtenção de velocidade de propagação de ondas, estimativa de espessura a partir de ensaios não destrutivos do eco-impacto, tipos de sensores, entre outros, já supracitados.

Os resultados obtidos no programa experimental, conclui-se que o método não destrutivo de eco-impacto consegue estimar a espessura da estrutura de concreto. Cumprindo com o objetivo geral deste trabalho, o método do eco-impacto, através dos resultados apresentados, foi capaz de estimar com eficácia, a espessura com uma precisão de um erro de espessura real de menos de 1%.

Durante a realização dos experimentos, observamos certa dificuldade em obter leituras para amostras com espessura inferior a 50 cm. Isso se deve ao fato do sensor utilizado neste trabalho, não alcançar uma faixa de frequência acima de 2900Hz, como disposto na Tabela 20.

Vale ressaltar, que para emprego deste apresto, é preciso que o operador tenha uma noção na execução das leituras, e conhecimento do analista na interpretação dos resultados e definição dos tempos de chegada da onda entre os transdutores.

O método não destrutivo do eco-impacto mostrou grande potencial, fácil aplicabilidade e rapidez em sua execução. Com uma forma de resposta rápida e eficiente, este método se traduz como uma ferramenta com características exclusivas para obtenção de resultados relacionados a controle de qualidade em concreto.

Considerações finais

Neste estudo, o principal objetivo consiste na utilização da técnica do ensaio não destrutivo de eco-impacto na estrutura de concreto. Para que esse objetivo fosse alcançado, foi produzido um equipamento experimental do eco-impacto por meio do estado da arte.

Durante a montagem experimental, alguns parâmetros foram verificados para que tivéssemos êxito em nossos estudos. Ressaltamos que qualquer investigador que deseje

trabalhar com o método de eco-impacto, é necessário ter um treinamento para a obtenção das leituras como: tipo de ondas; distância entre os transdutores; o tamanho do impactor; acoplamento dos transdutores e sobre tudo o procedimento da norma ASTM C1383-98.

No início da pesquisa, para montagem do equipamento, foram utilizados os sensores piezoelétricos, Arduino, e o *software LabVIEW*. Porém a utilização desse programa para leitura das ondas inviabilizou, o projeto devido ao tempo de resposta inadequado para visualização da forma de onda que acabava por não corresponder à frequência normal do corpo de prova.

No segundo momento, foram utilizados os mesmo sensores embora, sofressem um condicionamento e um osciloscópio com o *software OpenChoice Desktop*. Com esse protótipo, foi possível ter uma resposta adequada e foi o nosso equipamento de estudo durante a pesquisa.

Para tanto, foram produzidas amostras com dimensões conhecidas, analisando e comparando os resultados obtidos com o protótipo produzido obtendo assim, os resultados apresentados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ACI 208.2R. Crosshole Sonic Logging » Crosshole Sonic Logging » ASTM D6760-02 | ACI 228 . 2R. , p. 12–13.

NBR5738. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 - Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 1994. ,1994.

ASTM. C597 Standard test method for pulse velocity through concrete . American Society for Testing and Materials. Philadelphia. , p. 597.

BS EN. 12504-4. Testing Concrete – determination of ultrasonic pulse velocity . British Standards Institution, London. , p. 12504.

ASTMC1383. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - “Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates using the Impact-Echo Method,” 1998 Annual Book of ASTM Standards Vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA. , v. 04, p. 1998, 1998.

AKTS, C. B. Determining The Thickness of Concrete Pavements Using The Impact-Echo Test Method a Thesis Submitted to The Graduate School of Natural And applied Sciences of Middle East Technical University by Can Baran Aktas In Partial Fulfillment of The Requirements. , , n. June, p. 140, 2007.

ANDRADE, C. I. A. B. D. E.; CIVIL, E. Estimativa da Profundidade de Fendas no Concreto Através da Utilização do Ultra-som e do Eco-Impacto. ,2007.

ANDREUCCI, R. ANDREUCCI, R. Ensaio não destrutivo por ultrassom. Ed. Jan/2011. , p. 98, 2011.

BUNGEY, J.; MILLARD, S.; GRANTHAM, M. Testing of concrete in structures. 4th ed. 2006.

CALEGARI, L.; STANGERLIN, D. M.; SANTINI, E. J.; et al. Avaliação de Alguns Fatores Influentes na Velocidade Ultra-Sônica na Madeira. , p. 607–615, 2008.

CARINO, N. The impact-echo method: an overview. Proceedings of the 2001 Structures Congress & ..., p. 19, 2001.

CARINO, N. J. Training: Often the missing link in using NDT methods. *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 1316–1329, 2013.

CASSIOLATO, C. Artigos técnicos - Condicionamento de Sinais Analógicos & Sensores. , p. 17, 2011.

CINEL. Centro de Formação Profissional da Indústria Electrónica- Introdução ao LabVIEW. , p. 1–35, 2004.

CORPORATION, O. Origin 8 User Guide. , p. 560, 2007.

EVANGELISTA, A. Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos. PhD thesis in Civil Engineering–Universidade Federal ... , p. 239, 2002.

FERRARO, C. Advanced Nondestructive Monitoring and Valuation of. , p. 310, 2003.

HELENE, P. Supremacia do Concreto como Material Estrutural. ,1989.

IRRIGARAY, M. Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio da velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos na pasta do concreto. , p. 235, 2012.

JONES, R. Testing of concrete by an ultrasonic pulse technique , RILEM Int . Symp . on Nondestructive Testing of Materials and Structures, Paris, Vol. 1, Paper No. A-17 January 1954, 137. RILEM Bull., 19(Part 2), Nov. 1954.

JONES, R.; FAÇAOARU, I. Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method. *Matériaux et Constructions*, v. 2, n. 4, p. 275–284, 1969.

LORENZI, A.; FILHO, L, C, P, S.; CAMPAGNOLO, J, L. Development of artificial neural networks for interpreting ultrasonic pulse velocity tests in concrete Desenvolvimento de redes neurais artificiais para. , v. 4, n. 5, 2011.

LORENZI, A.; TISBIEREK, F. T.; CARLOS, L.; FILHO, S. Ultrasonic Pulse Velocity Analysis in Concrete Specimens 2 . Concrete Evaluation considering Nondestructive Testing. ,2007.

MALHOTRA, V.; CARINO, N. Handbook on nondestructive testing of concrete. 2004.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. TESTING. 2003.

MCROBERTS, M. Arduino Básico. 2011.

MEDEIROS, A. Aplicação do Ultra-Som na Estimativa da Profundidade de Fendas Superficiais e na Avaliação. , p. 200, 2007.

NASCIMENTO, R. Ensaios não Destrutivos em Estruturas de Concreteto por Utilização do Ultrasson. , p. 53, 2011.

PATSKO, L. Tutorial–Aplicações, Funcionamento e Utilização de Sensores. Maxwell Bohr: Instrumentação eletrônica, p. 84, 2006.

PÉREZ, G. A. Y. Estudo da Aplicabilidade do Ultra-Som na Avaliação das Propriedades do Concreto Asfáltico Florianópolis ; ,2009.

PESSIKI, S. P.; DAVIS, A. G.; DILLY, R. L.; et al. In-Place Methods to Estimate Concrete Strength Reported by ACI Committee 228. , p. 1–44, 2003.

PESSÔA, J. R. DE C. Universidade do Estado do Rio de Janeiro Centro de Tecnologia e Ciências Instituto Politécnico José Renato de Castro Pessoa Microtomografia com Raio X e processamento de imagem na obtenção da porosidade do concreto Nova Friburgo. , p. 131, 2011.

PETTRES, R.; LACERDA, L. DE. Reconhecimento de Padrões de Defeitos em Concreto a Partir de Imagens Térmicas Estacionárias e Redes Neurais Artificiais. *Ágora: revista de divulgação científica*, p. 103, 2012.

SAKAMOTO, J. M. S. Sensor em Fibra Óptica Aplicado à Caracterização de Atuadores Piezoelétricos Flexionais. , p. 173, 2006.

SANSALONE, J.; STREETT, W. B. The Impact-Echo Method. , p. 11, 1997.

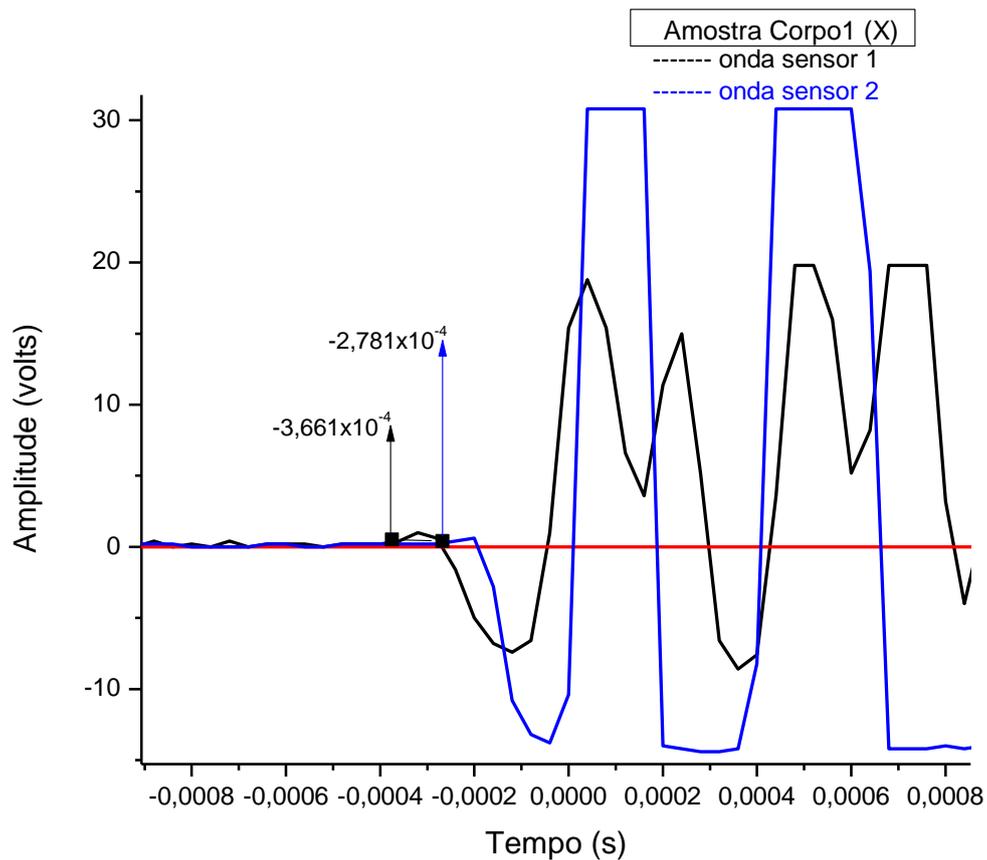
SANSALONE, M. J.; STREETT, W. B. The Impact-Echo Method. , v. 3, n. 2, p. 3–10, 1998.

APÊNDICE – Informações complementares de algumas amostras

Amostra corpo 1 (X)

Os resultados obtidos da amostra Corpo 1 (X) de acordo com a Tabela 1 na obtenção da velocidade de propagação de ondas e os gráficos da Figura 25 e 26, para obtenção da frequência dominante.

Figura 53 - Gráfico obtido através da amostra Corpo 1 (X) para obtenção velocidade da onda

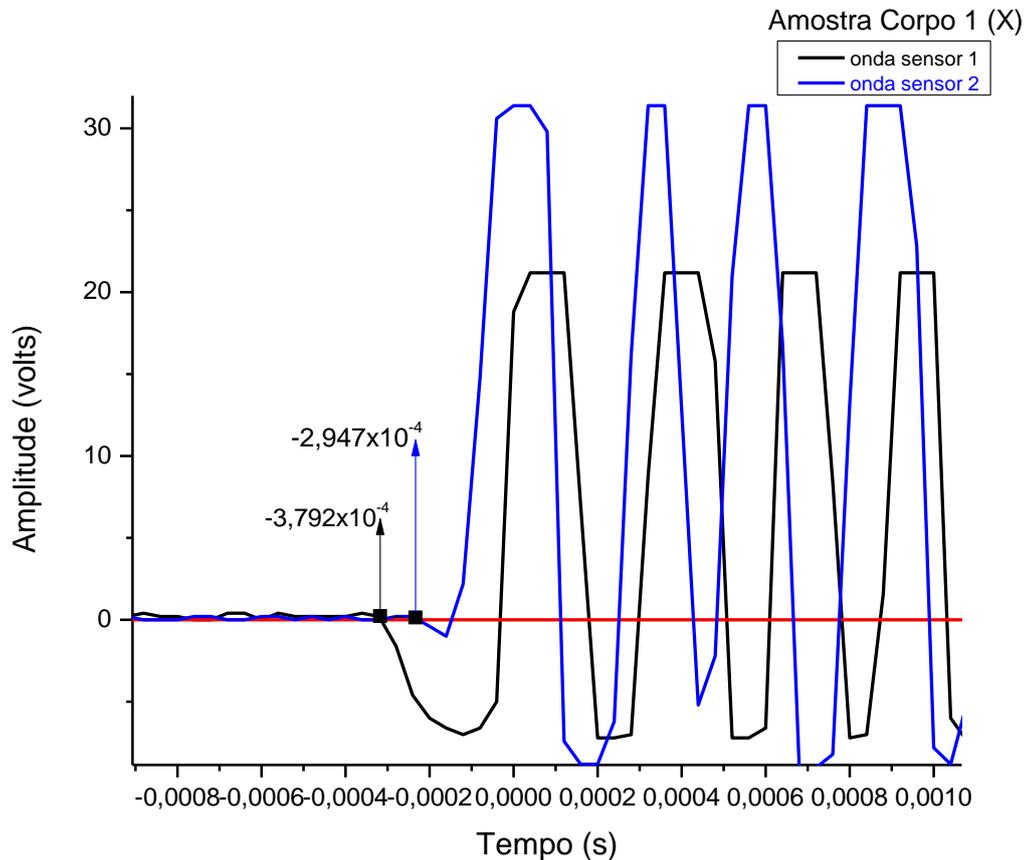


Nota: Gráfico do teste do eco-impacto quando se obteve uma variação de tempo de 88 μ s.

Fonte: O autor, 2014.

Usando essa variação e utilizando a Eq.(13), obtemos uma velocidade de onda da amostra Corpo 1 (X) de 3272 m/s, assim com, na Figura 54, uma variação de $85\mu\text{s}$ o que computa uma velocidade de onda de 3388 m/s como ilustrado na Tabela 4.

Figura 54 - Gráfico obtido do teste do eco-impacto por meio da amostra Corpo 1 (X)



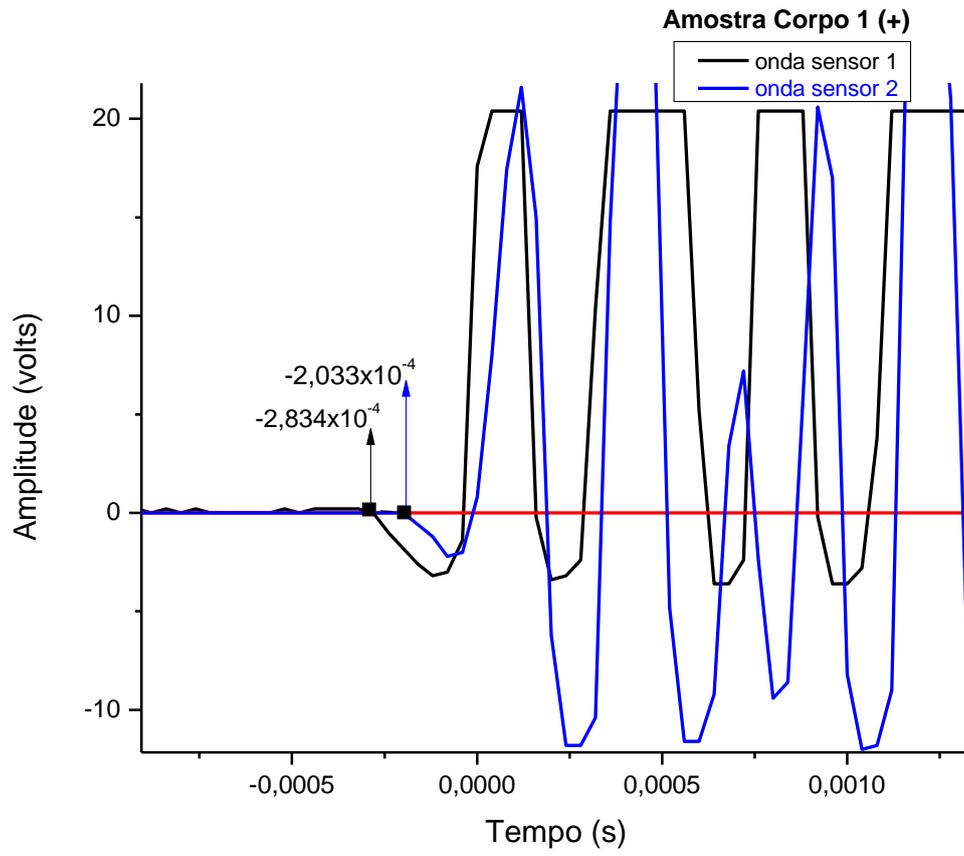
Nota: Teste realizado para obtenção de velocidade da onda da amostra Corpo 1 (X).

Fonte: O autor, 2014.

Amostra corpo 1 (+)

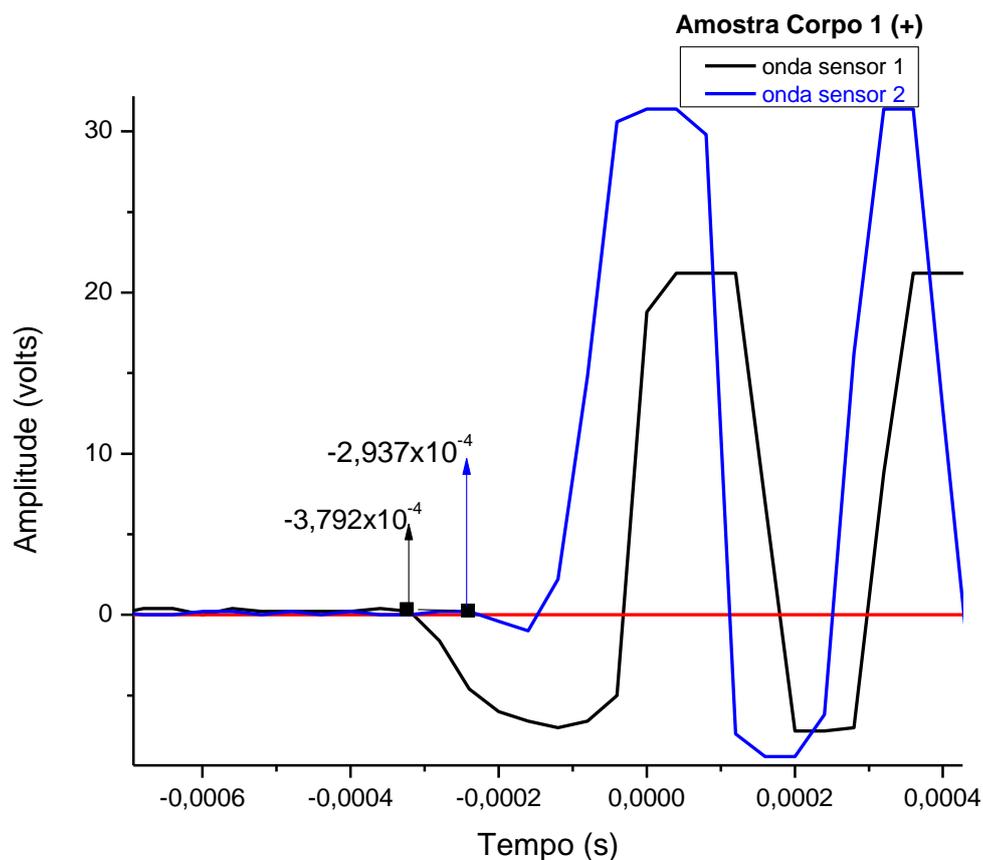
A seguir estão alguns resultados obtidos do eco-impacto por meio do procedimento A da norma ASTM C 1383-98 para amostra Corpo 1 (+), para obtenção da velocidade de propagação de onda como ilustrado na Tabela 5. Lembrado que o gráfico da Figura 55 e 56 foram ampliados para uma melhor visualização das variações.

Figura 55 - Gráfico obtido do teste do eco-impacto por meio da amostra Corpo 1 (+)



Fonte: O autor, 2014.

Figura 56 - Gráfico obtido do teste do eco-impacto por meio da amostra Corpo 1 (+)



Fonte: O autor, 2014.

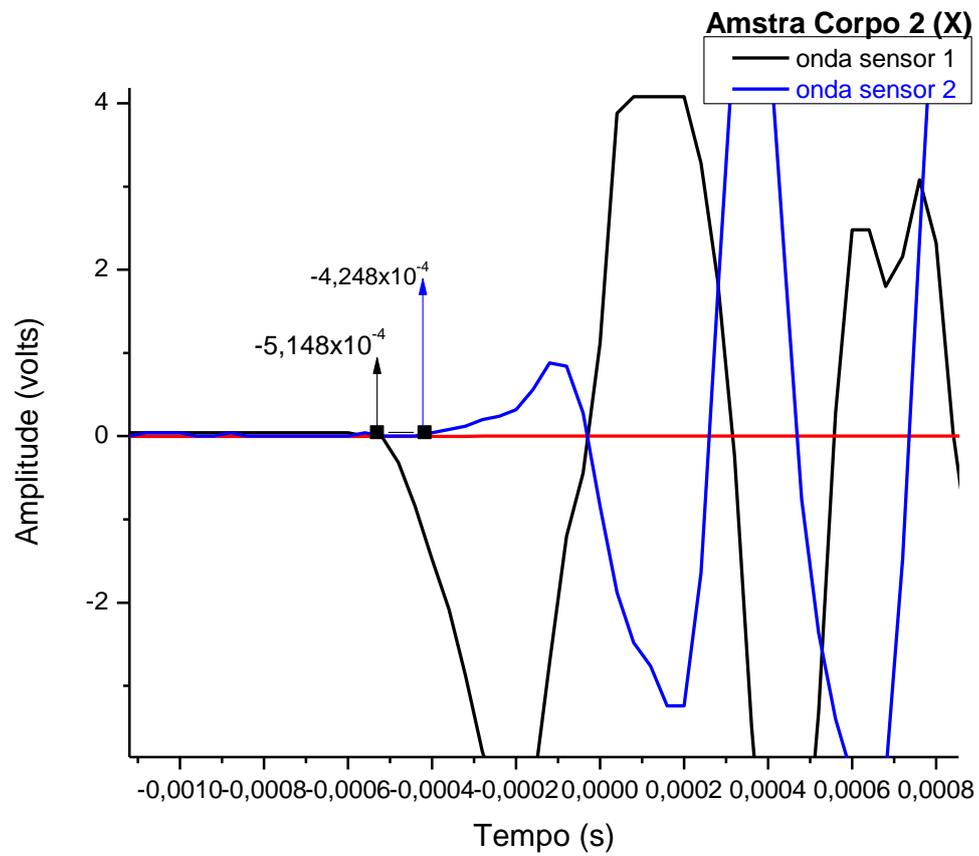
Mediante esses dois gráficos, computamos uma variação de $80\mu\text{s}$ para o gráfico da Figura 55 e $86\mu\text{s}$ para o gráfico da Figura 56.

Por meio da Eq.(13), foi possível obter as velocidades de propagação de ondas de 3600 m/s e 3349 m/s de acordo com a Tabela 5.

Amostra corpo 2 (X)

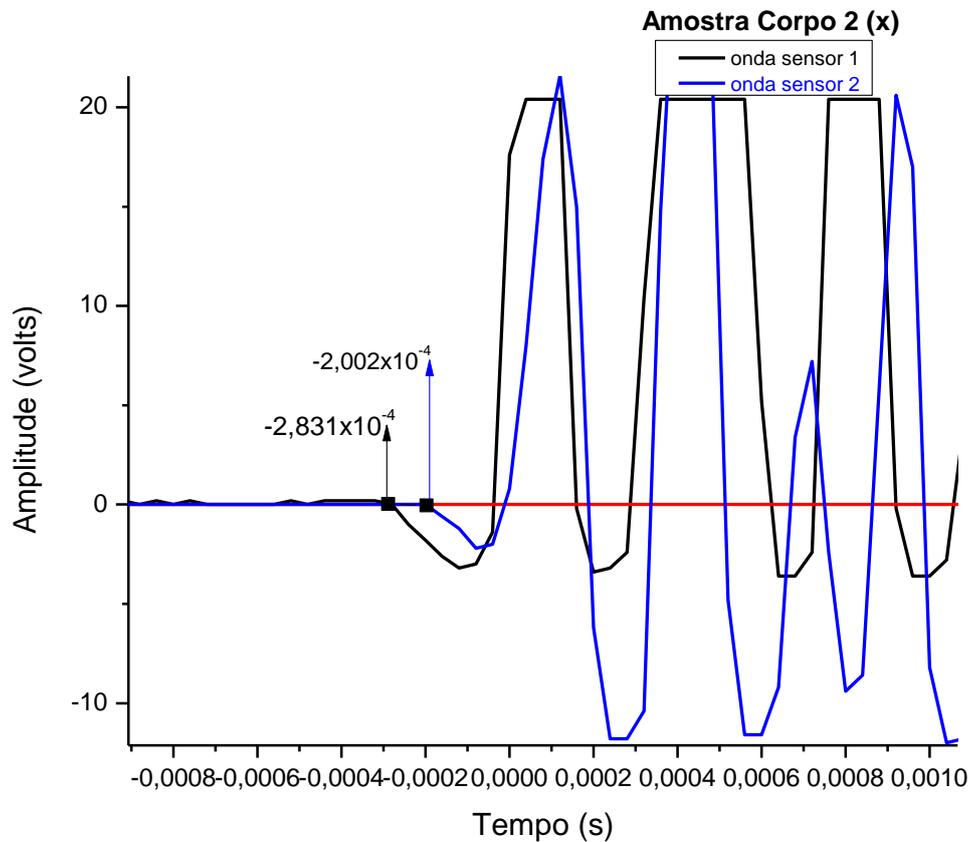
Alguns resultados obtidos na estimativa de velocidade da onda da amostra Corpo 2 (X) como mostra a Figura 57 e Figura 58.

Figura 57 – Gráfico obtido do teste do eco-impacto por meio da amostra Corpo 2 (X)



Fonte: O autor, 2014.

Figura 58 - Gráfico obtido do teste do eco-impacto por meio da amostra Corpo 2 (X)



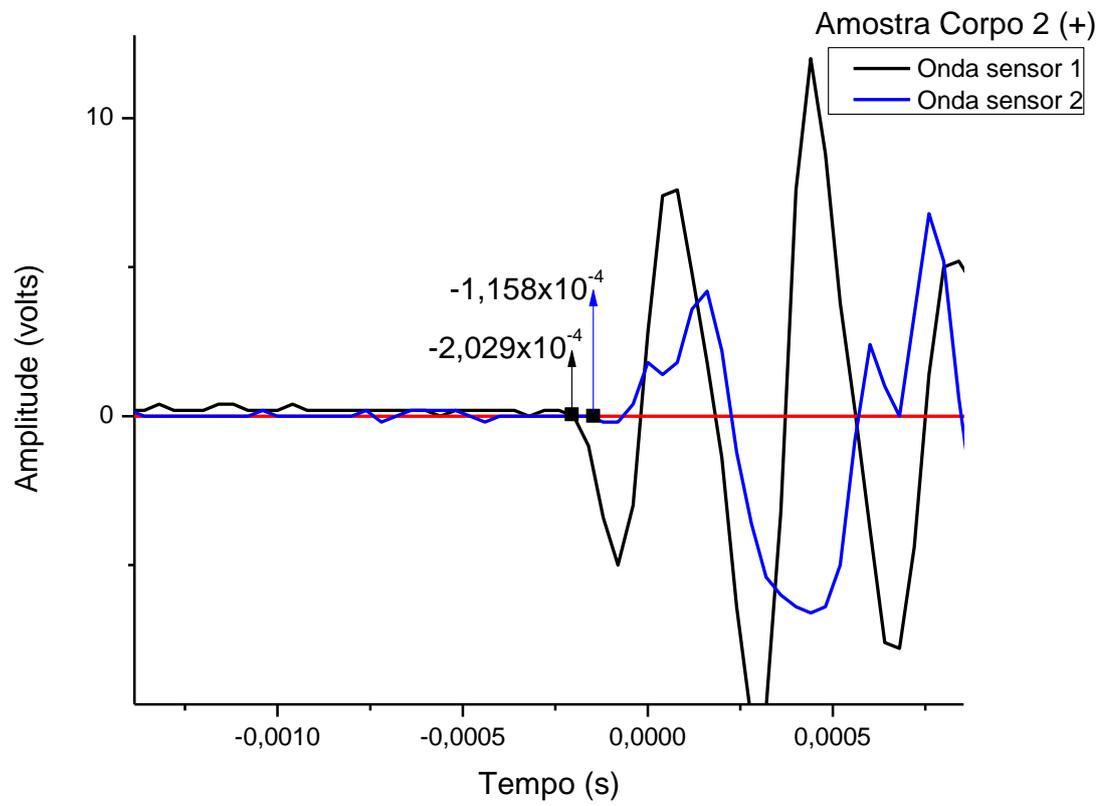
Fonte: O autor, 2014.

Realizando os cálculos com os gráficos obtidos, temos $90\mu\text{s}$ para o gráfico da Figura 57 e $83\mu\text{s}$ para Figura 58. Com essas variações de tempo, estimou-se a velocidade da onda de 3200 m/s para a variação de $90\mu\text{s}$ e de 3461 m/s para a variação de $83\mu\text{s}$, como ilustrado na Tabela 6.

Amostra corpo 2 (+)

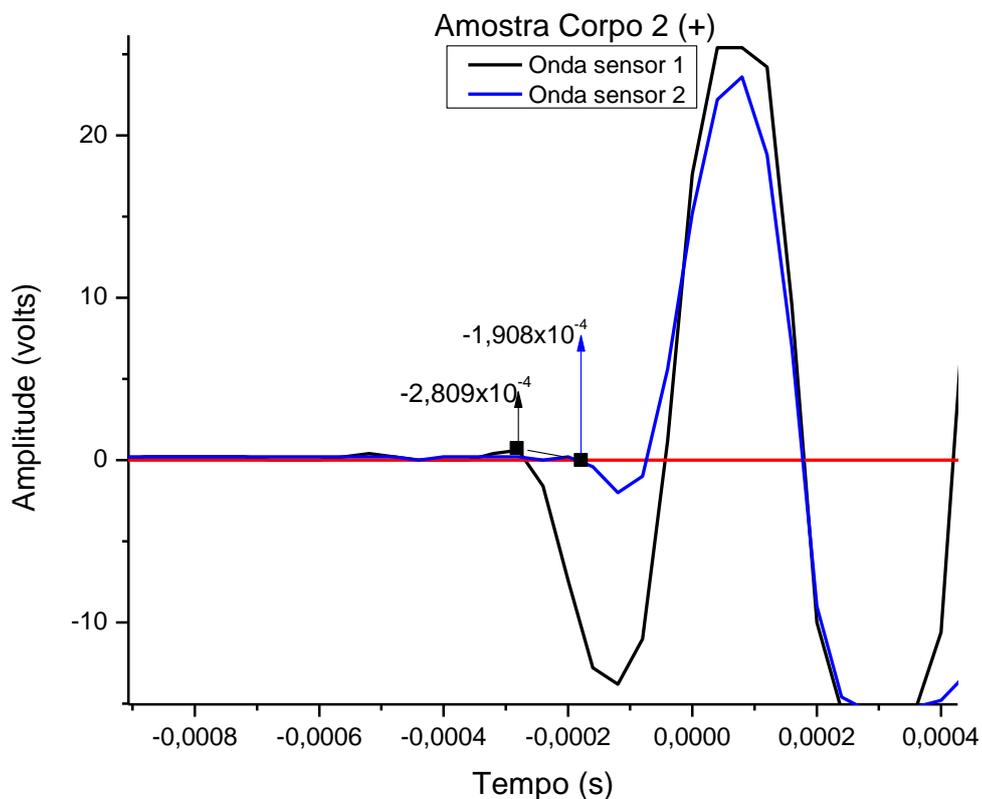
Resultados obtidos na estimativa de velocidade da onda da amostra Corpo 2 (+) como mostra a Figura 59 e Figura 60.

Figura 59- Gráfico obtido do teste do eco-impacto por meio da amostra Corpo 2 (+)



Fonte: O autor, 2014.

Figura 60- Gráfico obtido para estimativa da velocidade da amostra Corpo 2 (+)



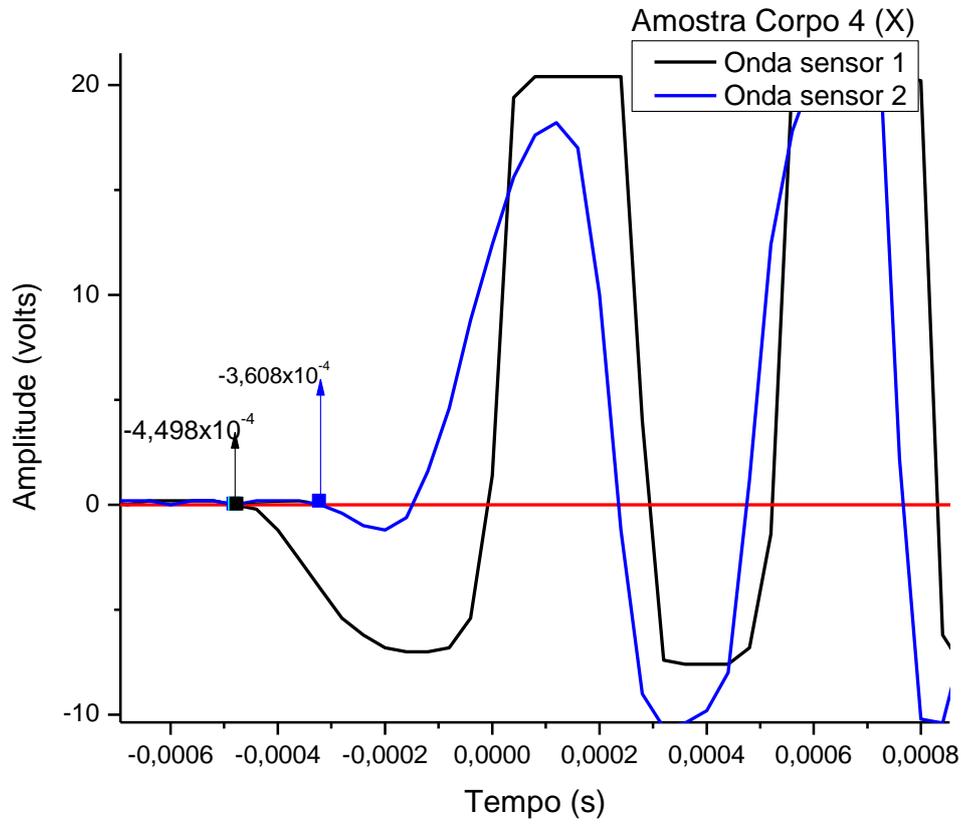
Fonte: O autor, 2014.

Os testes realizados, através dos gráficos obtidos, temos $87\mu\text{s}$ para o gráfico da Figura 59 e $80\mu\text{s}$ para Figura 60. Com essas variações de tempo, estimou-se a velocidade da onda de 3310 m/s para a variação de $87\mu\text{s}$ e de 3600 m/s para a variação de $80\mu\text{s}$, como ilustrado na Tabela 7.

Amostra corpo 4 (X)

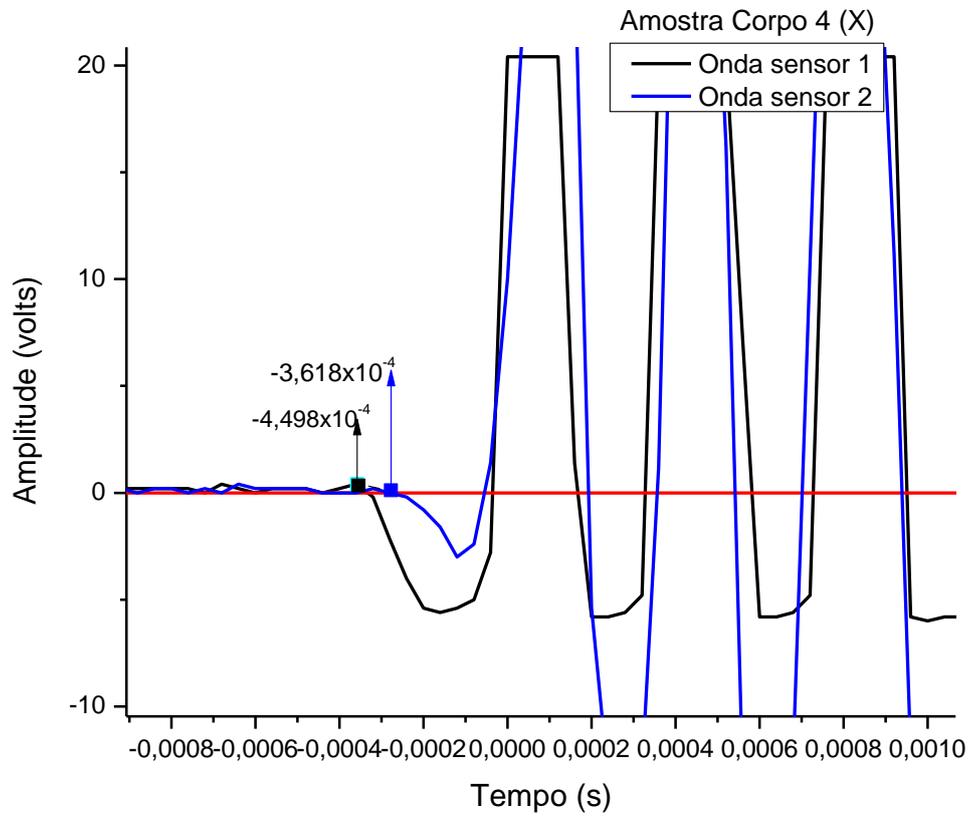
A seguir, temos alguns resultados das análises feita para cálculo da velocidade de propagação de onda da amostra Corpo 4 (X) como ilustrado na Tabela 9.

Figura 61- Gráfico para obtenção de velocidade de onda da amostra Corpo 4 (X)



Fonte: O autor, 2014.

Figura 62 - Gráfico para obtenção de velocidade de onda da amostra Corpo 4 (X)



Fonte: o autor, 2014.

Resultados obtidos da amostra Corpo 4 (X), de acordo com a Tabela 9. Podemos constatar que, na Figura 61 temos uma variação $89 \mu\text{s}$ e a Figura 62, uma variação de $88 \mu\text{s}$.