

PATRÍCIA BECKER DE ANDRADE

**ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE FENDAS NO CONCRETO
ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DO ULTRA-SOM E DO ECO-IMPACTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Florianópolis, Dezembro de 2007.

**ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE FENDAS NO CONCRETO
ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DO ULTRA-SOM E ECO-IMPACTO**

PATRÍCIA BECKER DE ANDRADE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D.

Florianópolis, Dezembro de 2007.

ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE FENDAS NO CONCRETO ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DO ULTRA-SOM E ECO-IMPACTO

Esta dissertação foi julgada e aprovada como requisito final para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, em sessão pública realizada em 05/12/2007.

Prof. Dr. Glicério Trichês
Coordenador do Curso do PPGEC – UFSC

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D. (Orientador)

Comissão Examinadora:

Prof. Luiz Carlos da Silva Pinto Filho, PhD. – LEME/UFRGS

Prof. Ivo José Padaratz, PhD. – ECV/UFSC

Prof^a.Henriette Lebre La Rovere, PhD. – ECV/UFSC

Dedico este trabalho
ao meu marido,
aos meus pais e
a Amanda com carinho e amor.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Roberto Caldas de Andrade Pinto, pela dedicação e presteza dispensada, pela compreensão, paciência, amizade e permanente disponibilidade no transcorrer desta dissertação. Este orientador não somente orientou mais também se tornou um grande amigo.

Ao meu marido, Alexandre de Andrade, pelo amor, compreensão e ajuda em todos os momentos que fizeram parte da minha vida.

A Amanda, minha filha, que é coisa mais importante da minha vida e o maior motivo para o término desta pesquisa.

Aos meus pais, Carlos e Juraci que sempre me apoiaram na busca desta realização pessoal e profissional e sempre estiveram presentes na minha vida.

Aos meus irmãos, Kátia e Diego que não estiveram presentes mais sempre me apoiaram para esta conquista.

A minha amiga Márcia que me ajudou, incentivou e me substituiu profissionalmente para realização dos ensaios desta pesquisa.

Aos meus amigos da Leme: Aires, Nelson, Paulo e Takasugi que sempre me incentivaram e ajudaram nas etapas deste mestrado.

A Leme Engenharia pelo investimento, incentivo, compreensão para realização desta conquista.

Aos meus amigos do GPEND (Grupo de Pesquisa em Ensaios não Destrutivos), Silvana, Mário, Daiane, Diego, Maisa, Raphael e Rodolfo pela ajuda e companheirismo na realização desta conquista.

Ao professor Ivo José Padaratz pela ajuda, colaboração e incentivo nas diversas etapas deste trabalho.

Ao Arthur Medeiros por esclarecimentos e presteza nos momentos necessários.

Aos laboratórios LMCC e LEE pela ajuda e compressão nos dias dos ensaios e caracterização dos materiais.

Aos Professores Zücks e Narbal, pela ajuda e paciência, especialmente nos dias de concretagem e utilização do laboratório.

A todos os colegas de mestrado e professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, que eu conheci no decorrer da realização deste mestrado.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS e ABREVIACÕES.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABELAS.....	xx
RESUMO.....	xxiv
ABSTRACT	xxv
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação e Importância do Tema	1
1.2 Objetivo do Trabalho	2
1.2.1 Objetivo geral.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Organização do Trabalho.....	3
CAPÍTULO 2. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	4
2.1 Histórico.....	4
2.2 Ultra-Som.....	6
2.2.1 Princípio de Funcionamento	6
2.2.2 Modos de Transmissão.....	8
2.2.3 Tipos de ondas geradas	10
2.2.4 Fatores de influência	13
2.2.4.1 Tipo e dimensão do agregado graúdo	13
2.2.4.2 Proporcionamento da mistura	14
2.2.4.3 Tipo de Cimento.....	16
2.2.4.4 Temperatura	16
2.2.4.5 Umidade	17
2.2.4.6 Tamanho e forma do elemento estrutural.....	18
2.2.4.7 Distância entre os transdutores.....	18
2.2.4.8 Presença de armaduras, fissuras ou vazios.....	19

2.2.5 Comprimento de propagação de onda, forma da peça e frequência do transdutor emissor	21
2.2.6 Normas disponíveis	22
2.3 Eco-Impacto	22
2.3.1 Princípio de Funcionamento	23
2.3.2 Ondas de tensão	24
2.3.2.1 Reflexão e Refração	25
2.3.2.2 Instrumentação	28
2.3.3 Utilização do Eco-impacto	29
2.3.4 Princípio da frequência	29
2.3.5 Duração do Impacto	32
2.3.6 Normas Disponíveis	34
2.3.6.1 ASTM Test Método C 1383	34
CAPÍTULO 3. NÃO-HOMOGENEIDADE DO CONCRETO	36
3.1 Homogeneidade do Concreto	36
3.2 Causas da Não-Homogeneidade	36
3.3 Aberturas	37
3.3.1 Aberturas na Superfície do concreto	39
3.3.1.1 Monitoramento de aberturas	40
3.3.2 Tipos de aberturas	43
3.3.3 Causas de aparecimento de aberturas	44
3.3.4 Aberturas nas estruturas de concreto de Usinas Hidrelétricas	45
3.4 Utilização de Ensaio Não Destrutivo para Estimar a Profundidade de Aberturas	53
3.4.1 Ultra-Som	53
3.4.1.1 Aberturas inclinadas	53
3.4.1.2 Obtenção da velocidade de propagação de onda ultra-sônica pelo método indireto	54
3.4.1.3 Estimativa da profundidade das aberturas	55
3.4.2 Eco-Impacto	63
CAPÍTULO 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
4.1 Considerações Iniciais	69
4.2 Variáveis Intervenientes	71
4.3 Materiais e Métodos	72
4.4 Descrição dos ensaios	76
4.4.1 Leituras com Ultra-som	76
4.4.1.1 Estimativa da profundidade das fendas	77
4.4.2 Leituras com Eco-Impacto	82

4.4.2.1	Parâmetros adotados para ensaio	82
4.4.2.2	Determinação da velocidade das ondas.....	83
4.4.2.3	Estimativa da profundidade da fenda.....	83
CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS		84
5.1	Utilização do Ultra-Som	88
5.1.1	Velocidade de propagação pelo modo de transmissão indireta	88
5.1.2	Estimativa da Profundidade de Fendas Verticais.....	92
5.1.2.1	Amostra 1 - Fenda de $h = 2,5$ cm	92
5.1.2.2	Amostra 2 - Fenda de $h = 5,0$ cm	98
5.1.2.3	Amostra 3 - Fenda de $h = 7,5$ cm	102
5.1.2.4	Amostra 4 - Fenda de $h = 10,0$ cm	107
5.1.3	Análise dos resultados das fendas perpendiculares.....	111
5.1.3.1	Comparativo entre Velocidades	111
5.1.3.2	Comparativo Procedimento D.....	112
5.1.3.3	Comparativo entre Modelos Linear e Eqüidistante.....	113
5.1.4	Estimativa da Profundidade de Fendas Inclinadas.....	114
5.1.4.1	Amostra 5 - Fenda de $h = 7,5$ cm	115
5.1.4.2	Amostra 6 - Fenda de $h = 6,2$ cm	119
5.1.4.3	Amostra 7 - Fenda de $h = 8,5$ cm	123
5.1.5	Análise dos resultados das fendas inclinadas.....	127
5.1.5.1	Comparativo entre Velocidades	127
5.1.5.2	Comparativo Procedimento D.....	128
5.1.5.3	Comparativo entre Modelos Linear e Eqüidistante.....	128
5.2	Utilização do Eco-Impacto	130
5.2.1	Resultados dos testes experimentais	130
5.2.2	Velocidade de propagação pelo modo de transmissão indireta	131
5.2.3	Estimativa da Profundidade de Fendas Verticais.....	135
5.2.3.1	Amostra 1 - Fenda com $h = 2,5$ cm	135
5.2.3.2	Amostra 2 - Fenda com $h = 5$ cm	138
5.2.3.3	Amostra 3 - Fenda com $h = 7,5$ cm	139
5.2.3.4	Amostra 4 - Fenda com $h = 10$ cm	140
5.2.4	Estimativa da Profundidade de Fendas Inclinadas.....	140
5.2.4.1	Amostra 5 – Fenda com $h = 7,5$ cm	140
5.2.4.2	Amostra 6 - Fenda com $h = 6,2$ cm	142
5.2.4.3	Amostra 7 - Fenda com $h = 8,5$ cm	143
5.2.5	Análise dos resultados das fendas verticais e inclinadas	143
5.2.5.1	Comparativo entre Velocidades	143
5.2.5.2	Comparativo das profundidades da fendas	144
5.3	Comparação entre o ultra-som e o eco-impacto	145

5.4	Observações com relação À utilização do eco-impacto	147
CAPÍTULO 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		149
6.1	Conclusões	149
6.2	Sugestão para Trabalhos Futuros.....	152
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		153
Anexo A		159
Anexo B.....		160
Anexo C		162
Anexo D		165
Anexo E.....		167

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

Abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
EN-ISO	European Committee for Standardization
IMPACT-ECHO	Eco-Impacto
NBR	Norma Brasileira
NIST	National Institute of Standards and Technology
PUNDIT	Portable Ultrasonic Non Destructive Indicating Tester
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et des Recherches sur les Matériaux et les Constructions
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

Símbolos

a = distância do transdutor à barra de aço.

a/c = relação água/cimento.

d = diâmetro da barra.

D = diâmetro da esfera de aço.

E = módulo de elasticidade.

E_d = módulo de elasticidade dinâmico.

f = frequência.

f_c = resistência a compressão do concreto.

f_{ct} = resistência do concreto à tração direta.

G = módulo de elasticidade.

h = profundidade da fenda.

k_1 = relacionado à distância do transdutor à barra de aço ao percurso total de transmissão.

L = distância percorrida pela onda.

L_c = distância percorrida pela onda sem abertura.

L_f = percurso da onda desviando da abertura.

PdP = difração da onda P.

t = tempo de propagação da onda.

t_c = tempo contato do impacto.

t_0 = começo do impacto.

t_1 = tempo de chegada da onda P ao transdutor 1.

t_2 = tempo de chegada da onda P ao transdutor 2.

T = profundidade da interface refletida.

T_f = tempo de propagação ao redor da fenda.

T_c = tempo de propagação, para uma mesma distância entre transdutores, em regiões onde não há fenda.

V = velocidade de propagação da onda.

V_e = velocidade de propagação da onda medida dentro da região de influência da barra de aço.

V_m = velocidade de propagação da onda P.

V_p = velocidade de propagação da onda P.

V_{pp} = velocidade de propagação da onda na espessura da placa.

V_r = velocidade de propagação da onda R.

V_s = velocidade de propagação da onda S.

V_{s1} = velocidade de propagação da onda na barra de aço embebida no concreto.

X = distância do transdutor à fenda.

Z = impedância acústica.

w = largura da abertura.

β = fator de forma determinado pela geometria da peça.

θ = inclinação da abertura.

Δt = intervalo de tempo entre o começo do impacto e a chegada da onda ao transdutor.

Δt^* = intervalo de tempo entre as chegadas das ondas aos transdutores.

λ = comprimento de onda.

ν = coeficiente de Poisson dinâmico.

ρ = densidade do material.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de funcionamento do aparelho de ultra – som (Naik e Malhotra, 1991).....	7
Figura 2.2 - Modos de transmissão.....	8
Figura 2.3 - Modo de transmissão indireto. Fonte: (NBR 8802 ,1994).....	9
Figura 2.4 - Determinação da velocidade de propagação pelo modo de transmissão indireto. Fonte: (NBR 8802, 1994).	10
Figura 2.5 – Tipos de ondas geradas em um sólido: longitudinais, transversais e superficiais (Bungey, 1982 <i>apud</i> Meneghetti, 1999).	11
Figura 2.6 - Simulação de elementos finitos de impacto em uma placa. (Fonte: Sansalone e Carino, 1986 <i>apud</i> Carino, 2001).....	12
Figura 2.7 - Efeito do tamanho máximo do agregado na correlação entre a velocidade de pulso e a resistência (Fonte: Sturup, Vecchio & Carantin, 1984, p 219 <i>apud</i> Evangelista, 2002).....	14
Figura 2.8 - Correlação entre a velocidade de pulso e a resistência à compressão do concreto para diferentes proporções a diferentes idades. (Fonte: Sturup, Vecchio & Carantin, 1984, p 219 <i>apud</i> Evangelista, 2002).....	15
Figura 2.9 - Correlação entre a velocidade de pulso e a resistência à compressão (escala logarítmica), em concretos com diferentes relações agregado/cimento e fator $a/c = 0,45$ (Fonte: Elvery & Ibrahim, 1976, p 187 <i>apud</i> Meneghetti, 1999).....	15
Figura 2.10 - Efeito do tipo de cimento na correlação entre a velocidade de pulso e a resistência à compressão. (Fonte: Evangelista, 2002)	16
Figura 2.11 - Efeito da temperatura sobre a correlação entre a velocidade de pulso e a resistência ($a/c = 0,45$; $agreg./cim. = 5,0$). (FONTE: Elvery & Ibrahim, 1976, p 187 <i>apud</i> Meneghetti, 1999)	17
Figura 2.12 – Efeito da umidade sobre a correlação entre a velocidade de pulso e a resistência à compressão. (Fonte: Sturup, Vecchio & Caratin, 1984, p 223 <i>apud</i> Meneghetti, 1999).....	18
Figura 2.13 – Efeito do diminuição da distância entre os transdutores (Fonte: Bungey, 1982)....	19
Figura 2.14 – Velocidade de propagação do ultra-som em função da distância a/L para um corpo de prova de 33 dias. (Fonte: Dorneles, Pinto e Padaratz, 2004).	20

Figura 2.15 – Diagrama simplificado do método de Eco-impacto (Fonte: Sansalone, 1997).....	24
Figura 2.16 - Função de força-tempo para o impacto elástico de uma esfera em um sólido (Fonte: Sansalone, 1997).	25
Figura 2.17 - Comportamento de uma onda P incidente em uma interface dois meios diferntes: (a) reflexão e refração; (b) conversão de modo. (Fonte: Carino, 2004).	26
Figura 2.18 - (Esquerda) Esferas de aço para obter impactos com diferente tempos de contato; (Direito) Esferas de aço acopladas a hastes (Fonte: Carino, 2001).	28
Figura 2.19 - Os primeiros 4 modos correspondem ao espectro de amplitidão experimental para sólido de 0.3 m (Fonte: Lin e Sansalone, 1992b).....	29
Figura 2.20 - Princípio de análise de freqüência: a forma da onda de domínio de tempo tem um padrão periódico devido à chegada da onda P que sofre reflexões múltiplas entre o topo e fundo da placa; a freqüência de chegada da onda P está diretamente relacionada à espessura da placa. (Fonte: Carino, 2001).	30
Figura 2.21 – Impacto e vibração da placa (Fonte: Sansalone, 1997).....	31
Figura 2.22 - O método de impacto-eco: impacto mecânico é usado para gerar ondas de tensão e um receptor próximo ao ponto de impacto mede o movimento de superfície resultante. (Fonte: Carino, 2001)	33
Figura 2.23 – Distribuição de freqüências correspondente à relação força-tempo. (Fonte: Sansalone, 1997).....	33
Figura 2.24 – Procedimento para medir espessuras de placas de acordo com ACTM C 1383: Procedimento A é usado para determinar a velocidade da onda P e Procedimento B é usado determinar a freqüência da espessura. (Fonte: Carino, 2001).	35
Figura 3.1 – Fluxograma de manutenção e inspeções.	39
Figura 3.2 – Geometrias de aberturas de superfície: (a) perpendicular, (b) inclinada e (c) curva. (Fonte: Sansalone 1997).....	40
Figura 3.3 – Instalação de placas de vidro para monitoramento de aberturas.....	41
Figura 3.4 – Instalação de placas de vidro com cruz para monitoramento de aberturas.....	41
Figura 3.5 – Instalação de pinos metálicos para monitoramento de aberturas.....	42
Figura 3.6 – Medidor triortogonal mecânico com realização das leituras.....	43
Figura 3.7 – Fissurômetro: Medida da abertura da fenda.....	43
Figura 3.8 – Vista geral da UHE Passo Fundo.....	46

Figura 3.9 – Fissura encontrada na Casa de Força da UHE Passo Fundo.....	47
Figura 3.10 – Pino metálico para monitoramento da trinca na parede da Casa de Força da UHE Passo Fundo.....	47
Figura 3.11 – Medidor triortogonal mecânico instalado para monitoramento da trinca na parede da Casa de Força da UHE Passo Fundo.....	47
Figura 3.12 – Fissura encontrada na Casa de Força da UHE Passo Fundo.....	48
Figura 3.13 – Fissura à 45° encontrada na Casa de Força da UHE Passo Fundo.....	48
Figura 3.14 – Fissura à 45° encontrada na Casa de Força da UHE Passo Fundo.....	48
Figura 3.15 – Trinca encontrada no piso da Casa de Válvulas da UHE Passo Fundo.....	49
Figura 3.16 – Vista geral da UHE Machadinho.....	49
Figura 3.17 – Trinca encontrada na crista do Vertedouro da UHE Machadinho.....	50
Figura 3.18 – Trinca encontrada no teto da galeria de drenagem do Vertedouro da UHE Machadinho.....	50
Figura 3.19 – Fissura na Casa de Força da UHE Machadinho.....	51
Figura 3.20 – Fissura com infiltração encontrada na Casa de Força da UHE Machadinho.....	51
Figura 3.21 – Fissura vertical na parede da Casa de Força da UHE Machadinho.....	51
Figura 3.22 – Curva tempo de propagação da onda (t) versus distância (d) para obtenção da velocidade e detecção da fenda.....	53
Figura 3.23 – Leitura de ultra-som ao redor de uma abertura inclinada. (Fonte: BS 1881: Part 203, 1986 <i>apud</i> Medeiros, 2007).....	54
Figura 3.24 – Procedimento indireto para obtenção da velocidade de propagação da onda.....	55
Figura 3.25 – Medida da profundidade de uma fenda. (Fonte: Bungey , 1989).	55
Figura 3.26 – Medida da profundidade de uma abertura, modelo eqüidistante. (Fonte: Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007).....	59
Figura 3.27 – Curva obtida com tempos de propagação (T_i) x distância (S_i) (Fonte: Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007).....	60
Figura 3.28 – Medida da profundidade de uma abertura, modelo linear. (Fonte: Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007).....	61
Figura 3.29 – Curva obtida com tempos de propagação (T) x distância (X) (Fonte: Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007).....	62
Figura 3.30 – Reflexão e difração de ondas P de uma abertura de superfície: (a) onda P inicial gerada por impacto, (b) P_c é a P-onda refletida da abertura, (c) e (d) P_dP é a difração da onda P do fundo da fenda. (Fonte: Sansalone, 1998).....	63

Figura 3.31 - Diagrama esquemático que mostra um método de <i>time-of-flight</i> para medir profundidade da abertura. (Fonte: Sansalone, 1998)	64
Figura 3.32 – Esquema da representação do teste para medida da velocidade (Fonte: Sansalone, 1997).....	65
Figura 3.33 – Execução do ensaio para obtenção da velocidade da onda.	66
Figura 3.34 – Esquema do teste para medida da velocidade pelo método 1 e 2 (Fonte: Sansalone, 1997).....	66
Figura 3.35 - Medindo a profundidade de uma abertura de superfície: (a) esquema de ligação de teste experimental, e (b) formas de onda da amostra (Fonte: Sansalone, 1998).....	67
Figura 4.1 - Seqüência para indução das fendas.....	70
Figura 4.2 – Fenda concluída e amostra rotacionada para realização das leituras.....	70
Figura 4.3 – Tipo de fendas induzidas.....	71
Figura 4.4 – Forma das setes amostras de 20 x 20 x 80 cm.	73
Figura 4.5 – Início da concretagem com vibrador.....	74
Figura 4.6 – Término da concretagem.....	74
Figura 4.7 – Indução das fissuras com placas de aço.....	74
Figura 4.8 - Aparelho PUNDIT utilizado nos ensaios.....	76
Figura 4.9 – Calibração do aparelho PUNDIT utilizado nos ensaios.....	76
Figura 4.10 – Esquema para leituras com ultra-som.	77
Figura 4.11 – Procedimento A – Transmissor fixo antes da fenda a 5 cm e receptor variando depois da fenda de 5 em 5 cm.....	78
Figura 4.12 – Realização da leitura com o ultra-som – Procedimento A.....	78
Figura 4.13 – Procedimento B – Transmissor fixo antes da fenda a 10 cm e receptor variando depois da fenda de 10 em 10 cm.....	79
Figura 4.14 – Realização da leitura com o ultra-som – Procedimento B.....	79
Figura 4.15 – Procedimento C – Transmissor fixo antes da fenda a 10 cm e receptor variando depois da fenda de 5 em 5 cm.....	80
Figura 4.16 – Procedimento D – Variando transmissor e receptor com a mesma distância de 5 em 5 cm.....	80
Figura 4.17 – Procedimento E – Variando transmissor e receptor com a mesma distância de 2,5 em 2,5 cm.....	81
Figura 4.18 - Aparelho <i>IMPACT-ECHO</i> utilizado nos ensaios.	82

Figura 5.1 – Amostra 1 – Dimensões reais após a concretagem.	84
Figura 5.2 – Amostra 2 – Dimensões reais após a concretagem.	85
Figura 5.3 – Amostra 3 – Dimensões reais após a concretagem.	85
Figura 5.4 – Amostra 4 – Dimensões reais após a concretagem.	86
Figura 5.5 – Amostra 5 – Dimensões reais após a concretagem.	86
Figura 5.6 – Amostra 6 – Dimensões reais após a concretagem.	87
Figura 5.7 – Amostra 7 – Dimensões reais após a concretagem.	87
Figura 5.8 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 1.	88
Figura 5.9 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 2.	89
Figura 5.10 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 3.	89
Figura 5.11 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 4.	90
Figura 5.12 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 5.	90
Figura 5.13 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 6.	91
Figura 5.14 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 7.	91
Figura 5.15 – Curva Modelo Eqüidistante - Procedimento D - Amostra 1.	95
Figura 5.16 – Curva Modelo Eqüidistante - Procedimento E - Amostra 1.	95
Figura 5.17 – Curva Modelo Linear - Procedimento A - Amostra 1.	96
Figura 5.18 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 1.	97
Figura 5.19 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 1.	97
Figura 5.20 – Curva Modelo Eqüidistante - Procedimento D - Amostra 2.	100
Figura 5.21 – Curva Modelo Linear - Procedimento A - Amostra 2.	101
Figura 5.22 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 2.	101
Figura 5.23 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 2.	102
Figura 5.24 – Curva Modelo Eqüidistante - Procedimento D - Amostra 3.	105
Figura 5.25 – Curva Modelo Linear - Procedimento A - Amostra 3.	106
Figura 5.26 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 3.	106
Figura 5.27 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 3.	107
Figura 5.28 – Curva Modelo Eqüidistante - Procedimento D - Amostra 4.	109
Figura 5.29 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 4.	110
Figura 5.30 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 4.	111
Figura 5.31 – Procedimento D – Comparativo entre Modelo 1, Modelo 2 e Modelo Eqüidistante.	112

Figura 5.32 – Comparativo entre Modelo Linear (5/5), Modelo Linear (10/10) e Modelo Eqüidistante.....	113
Figura 5.33 – Curva Modelo Eqüidistante - Procedimento D - Amostra 5.....	117
Figura 5.34 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 5.....	118
Figura 5.35 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 5.....	118
Figura 5.36 – Curva Modelo Eqüidistante - Procedimento D - Amostra 6.....	121
Figura 5.37 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 6.....	122
Figura 5.38 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 6.....	122
Figura 5.39 – Curva Modelo Eqüidistante - Procedimento D - Amostra 7.....	125
Figura 5.40 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 7.....	126
Figura 5.41 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 7.....	126
Figura 5.42 – Procedimento C – Comparativo entre Modelo 1, Modelo 2 e Modelo Eqüidistante.....	128
Figura 5.43 – Comparativo entre Modelo Linear Linear (10/10) e Modelo Eqüidistante.....	129
Figura 5.44 – Realização da leitura com Eco-Impacto – Obtenção velocidade.....	131
Figura 5.45 – Gráfico obtido das ondas com Eco-Impacto – Obtenção velocidade.	132
Figura 5.46 – Realização da leitura com Eco-Impacto – Obtenção velocidade ASTM C 1383.	133
Figura 5.47 – Gráfico obtido das ondas com Eco-Impacto – Formas da onda.....	134
Figura 5.48 – Espectro depois da transformação das ondas ppara domínio da freqüência.	134
Figura 5.49 – Realização da leitura com Eco-Impacto – Obtenção da profundidade da fenda – Amostra 1.....	136
Figura 5.50 – Imagem no display das ondas na realização da leitura com Eco-Impacto – Obtenção da profundidade da fenda – Amostra 1.....	136
Figura 5.51 – Detalhe das ondas na realização da leitura com Eco-Impacto, com o posicionamento dos cursores – Amostra 1.....	137
Figura 5.52 – Gráfico obtido com a leitura com Eco-Impacto – Obtenção da profundidade da fenda – Amostra 1.....	137
Figura 5.53 – Gráfico obtido com a leitura com Eco-Impacto – Obtenção da profundidade da fenda – Amostra 5.....	141
Figura 5.54 – Gráfico obtido com a leitura com Eco-Impacto – Obtenção da profundidade da fenda – Amostra 5.....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Recomendação da RILEM para frequência mínima do transdutor emissor de acordo com as dimensões da peça.	22
Tabela 2.2 – Resumo Impedâncias Acústicas. (Fonte: Carino, 2004).....	27
Tabela 2.3 – Relação entre diâmetro da esfera (impactador) com tempo contato e frequência. (Fonte: Sansalone, 1997).	34
Tabela 3.1 – Resumo das manifestações patológicas encontradas.....	38
Tabela 3.2 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura em função das classes de agressividade ambiental. Fonte: NBR 6118 (2003).....	39
Tabela 3.3 – Classificação de aberturas. Fonte: Padaratz (2005).....	44
Tabela 4.1 – Descrição das amostras.....	70
Tabela 4.2 - Composição por metro cúbico de concreto.	73
Tabela 4.3 – Resumo das amostras.....	75
Tabela 4.4 – Resistência à compressão de cada corpo-de-prova (MPa).	75
Tabela 5.1 – Resumo das velocidades obtidas pelo método indireto.	92
Tabela 5.2 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento A, B e C – Amostra 1.....	93
Tabela 5.3 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D e E – Amostra 1.....	93
Tabela 5.4 – Estimativa de “h” para modelo 1.....	94
Tabela 5.5 – Estimativa de “h” para modelo 2.....	94
Tabela 5.6 – Estimativa de “h” para modelo equidistante.....	96
Tabela 5.7 – Obtenção da estimativa de “h” pelo modelo linear.	98
Tabela 5.8 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento A, B e C – Amostra 2.....	98
Tabela 5.9 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D – Amostra 2.....	98
Tabela 5.10 – Estimativa de “h” para modelo 1.....	99
Tabela 5.11 – Estimativa de “h” para modelo 2.....	99
Tabela 5.12 – Estimativa de “h” para modelo equidistante.....	100

Tabela 5.13 – Obtenção da estimativa de “h” pelo modelo linear.	102
Tabela 5.14 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento A, B e C – Amostra 3.	103
Tabela 5.15 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D – Amostra 3.	103
Tabela 5.16 – Estimativa de “h” para modelo 1.	104
Tabela 5.17 – Estimativa de “h” para modelo 2.	104
Tabela 5.18 – Estimativa de “h” para modelo equidistante.	105
Tabela 5.19 – Obtenção da estimativa de “h” pelo modelo linear.	107
Tabela 5.20 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento B e C – Amostra 4.	108
Tabela 5.21 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D – Amostra 4.	108
Tabela 5.22 – Estimativa de “h” para modelo 1.	108
Tabela 5.23 – Estimativa de “h” para modelo 2.	109
Tabela 5.24 – Estimativa de “h” para modelo equidistante.	110
Tabela 5.25 – Obtenção da estimativa de “h” pelo modelo linear.	111
Tabela 5.26 – Resumo das velocidades obtidas com o ultra-som.	112
Tabela 5.27 – Resumo das profundidades das fendas estimadas pelo modelo linear e equidistante.	114
Tabela 5.28 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento B e C – Amostra 5.	115
Tabela 5.29 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D – Amostra 5.	115
Tabela 5.30 – Estimativa de “h” para modelo 1.	116
Tabela 5.31 – Estimativa de “h” para modelo 2.	116
Tabela 5.32 – Estimativa de “h” para modelo equidistante.	117
Tabela 5.33 – Obtenção da estimativa de “h” pelo modelo linear.	119
Tabela 5.34 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento B e C – Amostra 6.	119
Tabela 5.35 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D – Amostra 6.	119
Tabela 5.36 – Estimativa de “h” para modelo 1.	120

Tabela 5.37 – Estimativa de “h” para modelo 2.....	120
Tabela 5.38 – Estimativa de “h” para modelo eqüidistante.....	121
Tabela 5.39 – Obtenção da estimativa de “h” pelo modelo linear.	123
Tabela 5.40 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento B e C – Amostra 7.....	123
Tabela 5.41 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D – Amostra 7.....	123
Tabela 5.42 – Estimativa de “h” para modelo 1.....	124
Tabela 5.43 – Estimativa de “h” para modelo 2.....	124
Tabela 5.44 – Estimativa de “h” para modelo eqüidistante.....	125
Tabela 5.45 – Obtenção da estimativa de “h” pelo modelo linear.	127
Tabela 5.46 – Resumo das velocidades obtidas com o ultra-som.	127
Tabela 5.47 – Resumo das profundidades das fendas estimadas pelo modelo linear e eqüidistante.	129
Tabela 5.48 – Resumo das profundidades obtidas com variação das esferas de aço para amostra 4 (h = 10 cm).	130
Tabela 5.49 – Resumo das profundidades obtidas com variação das distâncias X para amostra 4.....	131
Tabela 5.50 – Resumo das velocidades obtidas com os transdutores fixos a 30 cm.....	133
Tabela 5.51 – Resumo das velocidades obtidas com procedimento B ASTM C 1383.	135
Tabela 5.52 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 1.	138
Tabela 5.53 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 2.	139
Tabela 5.54 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 3.	139
Tabela 5.55 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 4.	140
Tabela 5.56 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 5.	142
Tabela 5.57 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 6.	142
Tabela 5.58 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 7.	143
Tabela 5.59 – Resumo das velocidades obtidas com o eco-impacto.....	143
Tabela 5.60 – Resumo das profundidades das fendas estimadas pelo eco-impacto.....	144
Tabela 5.61 – Resumo das velocidades de propagação da onda obtidas com o ultra-som e o eco-impacto.....	146
Tabela 5.62 – Resumo das profundidades das fendas obtidas com o ultra-som e o eco- impacto.....	146

Tabela 6.1 – Análise física e química do cimento CII Z-32.....	160
Tabela 6.2 – Caracterização da brita 1.	161
Tabela 6.3 – Caracterização da areia fina.....	161
Tabela 6.4 – Resumo das profundidades obtidas com esfera de 6,5 mm para amostra 4.	162
Tabela 6.5 – Resumo das profundidades obtidas com esfera de 8,0 mm para amostra 4.	162
Tabela 6.6 – Resumo das profundidades obtidas com esfera de 9,5 mm para amostra 4.	163
Tabela 6.7 – Resumo das profundidades obtidas com esfera de 11,0 mm para amostra 4.	163
Tabela 6.8 – Resumo das profundidades obtidas com esfera de 12,5 mm para amostra 4.	164
Tabela 6.9 – Resumo das profundidades obtidas com distância de 5,0 cm para amostra 4.....	165
Tabela 6.10 – Resumo das profundidades obtidas com distância de 7,5 cm para amostra 4.....	165
Tabela 6.11 – Resumo das profundidades obtidas com distância de 10,0 cm para amostra 4....	166
Tabela 6.12 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 1.....	167
Tabela 6.13 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 2.....	167
Tabela 6.14 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 3.....	167
Tabela 6.15 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 4.....	167
Tabela 6.16 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 5.....	168
Tabela 6.17 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 6.....	168
Tabela 6.18 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 7.....	168

RESUMO

A necessidade de detecção de anomalias no concreto está cada vez mais ocorrente devido à preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto. Não homogeneidades como nichos, vazios, delaminações, aberturas em estruturas de concreto podem prejudicar o comportamento estrutural dependendo da sua localização e dimensão. Com isto surge, a necessidade de se encontrar métodos capazes de detecção destas anomalias de forma simples e segura sem causar danos ao elemento estrutural. Neste contexto, métodos não destrutivos baseados em propagação e reflexão de ondas de tensão, atendem estes requisitos.

Esta pesquisa estuda a utilização dos ensaios não destrutivos de ultra-som e eco-impacto na detecção e a estimativa da profundidade de fendas superficiais. Para tanto, foi conduzido um programa experimental com amostras de concreto confeccionadas em laboratório com fendas verticais e inclinadas de dimensões conhecidas, utilizando estes métodos não destrutivos.

Diferentes modelos matemáticos apresentados na literatura foram aplicados na estimativa da profundidade das fendas com a utilização do ultra-som, buscando avaliar qual destes seria o mais indicado para as fendas investigadas. Dentre os modelos investigados com a utilização do ultra-som, o modelo equidistante e o modelo linear apresentaram o menor erro médio para as fendas verticais e inclinadas respectivamente, de aproximadamente 10 %. Com o eco-impacto por outro lado, apresentou um erro médio menor de 3%.

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, ambos os ensaios não destrutivos revelaram ser eficientes na estimativa da profundidade de fendas, sendo que o eco-impacto obteve uma melhor precisão que o ultra-som.

Palavras-chave: Ensaios não-destrutivos; Ultra-som; Eco-impacto, Fendas superficiais.

ABSTRACT

The need of flaw detection in concrete structures has been an issue nowadays due to increased durability concerns of actual concrete members. Concrete flaws such as honeycombing, delaminations, surface opening cracks, internal cracks among others may impair the structural behavior of the concrete member depending upon their sizes and locations. It is necessary to use reliable methods to detect such flaws in a simple and secure way without causing any further damage to the concrete member. Non destructive acoustic methods based on the propagation and the reflection of stress waves in solids fulfill this requirement.

This research studies the application of ultrasound and the impact-echo methods in the detection and estimation of depth of surface opening cracks. An experimental program was developed which included the test of flawed concrete specimens with vertical and inclined surface opening cracks using both NDT methods.

Various mathematical models presented in the literature were applied to estimate the depth of vertical surface opening cracks using results from ultrasound measurements in order to evaluate which one of them would be more appropriated for the specimens studied. Among the models studied, the equidistant and the linear models showed the least error for the specimens with vertical and inclined cracks, respectively. An average error value of 10% was obtained. Time-of-flight results from the impact-echo method, on the other hand, suggested an average error of only 3% of the actual crack depths.

From the results obtained in this research, both NDT methods proved to be efficient in estimating the depth of surface opening cracks with the impact-echo being more accurate than the ultrasound.

Keywords: Non-destructive testing; Ultrasound; Impact-echo; Surface cracks.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E IMPORTÂNCIA DO TEMA

A evolução dos processos construtivos, associado à necessidade de rapidez na execução de obras pode trazer tanto benefícios como malefícios às estruturas de concreto. Os benefícios estão associados a obras mais esbeltas, mais arrojadas, executadas em tempo hábil e com menor consumo de concreto tornando-se mais econômicas. Por outro lado, existem ocasiões que trazem malefícios, podendo surgir das manifestações patológicas oriundos do processo construtivo.

A motivação desta pesquisa é decorrente da experiência profissional da autora em inspeções civis de Usinas Hidrelétricas. Estas inspeções buscam executar uma engenharia preventiva e corretiva quanto a possíveis problemas estruturais; procurando avaliar o desempenho destas estruturas e, nos casos pertinentes, elaborar recomendações técnicas e instruções de trabalho que orientem a sua execução. E, finalmente, avaliam o estado atual da instrumentação civil da Usina, propondo uma melhoria no sistema da instrumentação de auscultação.

As manifestações patológicas encontradas durante a vida útil de uma Usina Hidrelétrica podem ser classificadas principalmente em fendas, trincas, infiltrações e desprendimentos de concreto.

As fendas que ocorrem no concreto, dependendo do local da ocorrência, do tipo e da abertura, devem ser monitoradas continuamente após a inspeção. Algumas fendas ocorrem em determinado estágio da vida útil da estrutura e tornam-se estáveis no decorrer dos anos, devido a uma redistribuição de tensões. Outras fendas podem estar em plena atividade, devendo ser acompanhadas para definição de uma possível medida corretiva.

Um parâmetro importante para a avaliação da atividade de uma determinada fenda é a sua profundidade na estrutura. Fendas ativas se propagam pela estrutura “aumentando a sua profundidade” e podendo também aumentar a sua largura superficial.

A estimativa da profundidade da fenda durante uma inspeção específica serve para avaliar se esta fenda pode ser considerada ativa ou não em uma próxima inspeção. Permite também avaliar se a

profundidade atual da fenda afeta de alguma forma o comportamento estrutural da estrutura, ou facilita a percolação de água, pela mesma.

A estimativa da profundidade de uma fenda não é prática usual de uma inspeção rotineira, pois esta inspeção, normalmente é visual e tem um caráter qualitativo e não utiliza equipamentos específicos. Caso seja detectada alguma anomalia na estrutura, a equipe de inspeção avalia a necessidade de uma inspeção detalhada com a utilização dos equipamentos adequados para determinação da profundidade de fendas.

Uma definição mais precisa da profundidade de uma fenda só pode ser obtida a partir da retirada de testemunhos da peça estrutural, o que não é aconselhável, pois danifica localmente a estrutura. Uma alternativa seria o emprego de técnicas não destrutivas, como o ultra-som e o eco-impacto para a estimativa das profundidades de fendas, sem danificar a estrutura. Entretanto, ainda há a necessidade de avaliar a precisão das estimativas obtidas com a utilização destas técnicas, visto que ainda não existem muitas pesquisas nesta área nacionalmente.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é estimar a profundidade de fendas superficiais em elementos de concreto com a utilização dos ensaios não destrutivos de ultra-som e do eco-impacto e avaliar a precisão dos seus resultados.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos propostos para o trabalho foram:

- ✓ estudar o ensaio de ultra-som com os modelos de cálculo (tratamento das leituras) propostos por outros autores na estimativa da profundidade de fendas superficiais;
- ✓ estudar o ensaio do eco-impacto com o procedimento proposto de obtenção de leituras para estimativa da profundidade de fendas superficiais;
- ✓ comparar e verificar a eficácia dos dois ensaios na estimativa da profundidade das fendas;
- ✓ verificar as técnicas de interpretação dos resultados do eco-impacto;

- ✓ avaliar a influência de alguns parâmetros, como: distâncias entre transdutores, distância transdutor e impactador, tamanho impactador, entre outros, nos resultados obtidos;
- ✓ verificar os cuidados na operação de utilização do ultra-som e do eco-impacto.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Com o intuito de desenvolver o trabalho de uma forma que os objetivos almejados sejam alcançados com sucesso, através de informações, considerações e resultados, a presente dissertação está dividida em 7 capítulos.

O capítulo 1 trata da introdução ao tema, esclarecendo os objetivos que se pretende atingir, assim como a importância da dissertação.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sintetizada sobre ensaios não destrutivos, com um breve histórico, na qual o enfoque principal foi dado aos instrumentos para detecção de não homogeneidade no concreto principalmente o ultra-som e eco-impacto que serão utilizados nesta pesquisa.

No capítulo 3 é apresentado um resumo sobre não-homogeneidade no concreto enfocando aberturas e descrevendo: suas causas, os tipos encontrados, a utilização do ultra-som e do eco-impacto para determinação da profundidade de aberturas.

No capítulo 4 é apresentado o programa experimental que engloba: considerações iniciais, as variáveis intermitentes, seleção dos materiais, produção do concreto e a descrição dos ensaios.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com a utilização do ultra-som e do eco-impacto para a estimativa da profundidade das fendas, além de uma análise das leituras obtidas com cada equipamento e o comparativo entre os resultados obtidos com o ultra-som e o eco-impacto.

No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros com este foco.

CAPÍTULO 2. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

2.1 HISTÓRICO

A determinação das propriedades do concreto através de ensaios não destrutivos despertou a atenção dos tecnologistas do concreto por muitas décadas. A Segunda Guerra Mundial acelerou as pesquisas com relação aos testes não destrutivos usando ondas sônicas (Naik & Malhotra, 1991). Em 1960, métodos de ensaio foram propostos para uso em laboratório, com corpos-de-prova, através de técnicas vibracionais. Tais métodos foram desenvolvidos por autores como Powers, Obert, Hornibrook e Thomson (Naik & Malhotra, 2004).

Como conseqüência do surgimento de um número cada vez maior de construções com deteriorações precoces, houve uma necessidade de se desenvolver técnicas para avaliação das propriedades mecânicas, nível de comprometimento e deterioração do concreto buscando garantir cada vez mais segurança nas construções. Com isto, recentemente, tem surgido um interesse na utilização de técnicas para avaliar as condições existentes das construções, sem interromper a continuidade de suas funções, tais como os ensaios não-destrutivos.

Os ensaios não destrutivos podem ser divididos em dois grupos: aqueles usados para estimar propriedades mecânicas, e aqueles usados para localizar anomalias que não estão aparentes.

Estes ensaios, denominados genericamente como não destrutivos, podem ser classificados em não destrutivos propriamente dito e parcialmente destrutivos, ou seja, que causam pequenos danos ao elemento ensaiado, sem destruí-lo. Dentre as propriedades do concreto que podem ser avaliadas por meio de ensaios não destrutivos, incluem-se a massa específica, módulo de elasticidade e resistência. Ainda pode-se investigar a dureza superficial, absorção, permeabilidade e condições de umidade.

Os métodos para a avaliação da resistência do concreto encontrados atualmente são: esclerometria, ensaios de arrancamento, ensaio de fratura interna, ensaio de penetração de pinos, ensaio de aderência, ensaio de torque Stoll, método da maturidade, ultra-som e métodos combinados, sendo a esclerometria e o ultra-som os métodos mais difundidos.

Os ensaios para localizar anomalias no concreto se baseiam na interação das descontinuidades internas (fissuras, aberturas, vazios, nichos, etc.) com ondas de propagação eletromagnética, velocidade do pulso ultra-sônico, etc. São utilizados para buscar dados associados ao desempenho das construções, tais como: espessuras de pavimentos, identificação de trincas e delaminações, avaliação do grau de compactação (relativo), detecção de vazios e grau de deterioração de materiais, localização de armaduras e de outros objetos de interesse (Castro,2000).

Os principais métodos utilizados para localização de anomalias são: inspeção visual, auscultação, propagação de onda-tensão, termografia infravermelha, radar de sub-superfície, métodos nucleares, métodos magnéticos e elétricos, emissão acústica, fibras óticas e penetrabilidade.

Vários defeitos podem ser detectados com auxílio de ensaios não destrutivos, tais como: vazios, nichos de concretagem, delaminações (separação entre camadas), aberturas, não-homogeneidade e outros tipos de deterioração. Nos itens seguintes (2.2 e 2.3) serão detalhados os ensaios não destrutivos de ultra-som e eco-impacto aplicados à detecção de falhas no concreto.

2.2 ULTRA-SOM

As primeiras publicações sobre medições de velocidade de pulsos mecanicamente gerados apareceram nos Estados Unidos em meados de 1940, sendo constatado que a velocidade de propagação depende das propriedades elásticas do material, e quase não depende de sua geometria (Bungey, 1989).

2.2.1 Princípio de Funcionamento

A expressão ensaios dinâmicos ou de vibração, em termos gerais, abrange duas áreas: uma que envolve a determinação da frequência de ressonância ou outras características de um corpo-de-prova de concreto, quando sujeito a vibrações; e outra relativa à determinação da velocidade com a qual pequenos impulsos mecânicos atravessam o concreto, como classificado por Hamassaki (1986).

A velocidade de ondas ultra-sônicas transitando em um material sólido depende da densidade e das propriedades elásticas desse material, como é descrito na equação para ondas longitudinais abaixo:

$$V_p = \sqrt{\frac{KE_d}{\rho}} \quad (\text{Bungey, 1989, Pundit Manual, 1994}) \quad (2.1)$$

$$\text{com, } K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

onde:

V_p = velocidade da onda, m/s;

E_d = módulo de elasticidade dinâmico, N/m²;

ρ = massa específica, kg/m³;

ν = coeficiente de Poisson dinâmico.

Um transdutor eletro-acústico (formado por materiais cristalinos de efeito piezo-elétrico) ligado a um circuito eletrônico, recebe estímulo para oscilar mecanicamente, pois o circuito eletrônico emite pequenos pulsos elétricos ao transdutor excitando o cristal na sua frequência natural. Esta vibração gera os pulsos, os quais são transformados em ondas de energia mecânica pelo

transdutor-transmissor, o qual deve estar acoplado à superfície do concreto através de um meio adequado (gel, graxa, etc.). Para transmissão ou recepção do pulso, os transdutores devem estar completamente em contato com a superfície, caso contrário, a camada de ar existente introduzirá um erro na leitura do tempo. Um transdutor-receptor similar é acoplado ao concreto a uma distância conhecida do transdutor-transmissor e a energia mecânica é convertida novamente em pulsos elétricos de mesma frequência. Um dispositivo eletrônico cronometra o intervalo entre o início da transmissão e a recepção do pulso, que é mostrado por um mostrador digital.

A utilização de dois transdutores, um transmissor e outro receptor, caracteriza a utilização do ultra-som no modo transmissão. Já a utilização de um só transdutor que funciona como transmissor e receptor indica a utilização do ultra-som no modo reflexão, conhecido como eco-pulso.

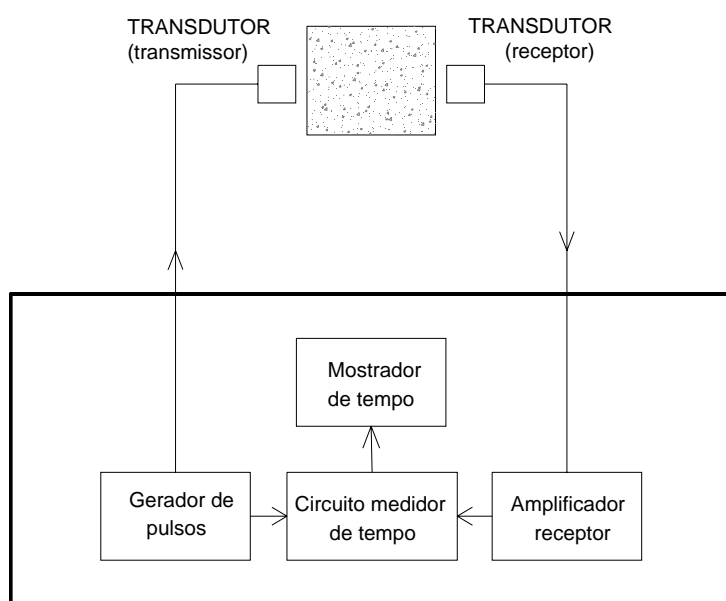


Figura 2.1 - Esquema de funcionamento do aparelho de ultra – som (Naik e Malhotra, 1991).

Esta forma de teste se desenvolveu no moderno método ultra-sônico, empregando para concreto pulsos na frequência de 20 a 200 kHz gerados e gravados em circuitos eletrônicos (Rilem, 1972). Testes ultra-sônicos em metais usam comumente frequências muito mais elevadas que para testes em concreto.

Como a faixa de velocidade de pulso do ultra-som no concreto é relativamente pequena (3.500 a 4.800 m/s), é necessário um grande cuidado, especialmente quanto ao manuseio do ultra-som.

O método de avaliação de propagação de onda ultra-sônica consiste em medir o tempo de percurso para que uma onda ultra-sônica atravesse o concreto (NBR 8802/94). O tempo de percurso entre os pontos de emissão e recepção da onda é medido eletronicamente. A distância percorrida pela onda, dividida pelo tempo de percurso, fornece a velocidade de propagação da onda.

Para um mesmo agregado, a velocidade de pulsos ultra-sônicos é influenciada por alterações da pasta de cimento, tais como, variação da relação água/cimento, tipo e dosagem de cimento, condições de cura, idade, que têm influência sobre o módulo de elasticidade da pasta de cimento endurecida (Almeida, 1993). É somente levando-se em conta estas limitações que se pode usar o ensaio de ultra-som para avaliar a resistência do concreto.

O método possibilita estimar a uniformidade e a resistência à compressão (correlacionada previamente) do concreto. Também pode ser usado para investigar danos provocados pelo fogo, congelamento e agentes químicos (Chung e Law, 1983, Selleck et al, 1998).

Descontinuidades (presença de vazios) no concreto podem ser detectadas devido às diferenças de velocidade de propagação das ondas nos vazios (ACI-364, 1993).

2.2.2 Modos de Transmissão

O ensaio pode ser realizado em três modos de transmissão: direto, indireto e semi-direto.

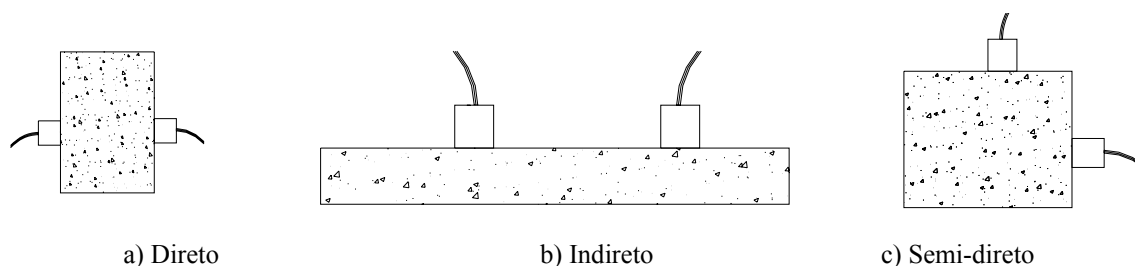


Figura 2.2 - Modos de transmissão.

O modo de transmissão direta é o mais eficaz, pois neste é transmitida a máxima energia. Este modo é bastante utilizado para correlação com resistência à compressão, obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, para detecção de falhas internas e avaliação de qualidade do concreto.

O modo de transmissão semi-direta é menos utilizado, porém é muito útil quando se quer evitar regiões de concentração de armaduras como cantos de pilares e vigas.

O modo de transmissão indireta é o menos recomendado, pois a intensidade do sinal recebido é significativamente menor do que a recebida no modo direto. Este modo é utilizado quando se tem acesso a apenas uma face do corpo-de-prova ou componente estrutural como no caso de lajes, pavimentos de concreto ou barragens.

A velocidade obtida pelo modo de propagação indireto depende predominantemente da qualidade da região superficial do concreto, que pode não ser representativa do elemento como um todo. Desta forma a velocidade obtida poderá não ser a mesma da proveniente do modo de transmissão direto em uma mesma peça. No modo de transmissão indireto também se desconhece o caminho percorrido pelo pulso já que o transdutor não é pontual (Naik, Malhotra e Popovics, 2004).

A NBR 8802 (1994) descreve um procedimento especial para a obtenção da velocidade de propagação de onda ultra-sônica pelo modo de transmissão indireto. Este procedimento consiste em, fixar o transdutor transmissor e caminhar com o receptor pelo concreto por distâncias pré-definidas fazendo leituras sucessivas, conforme a Figura 2.3. Com estas leituras plota-se um gráfico de Tempo de Propagação x Distância marcando os pontos para cada distância lida, conforme a Figura 2.4. A partir destes pontos é traçada uma reta que melhor se ajuste a eles. A inclinação desta reta é a velocidade, obtida pelo modo de transmissão indireto, do material ensaiado.

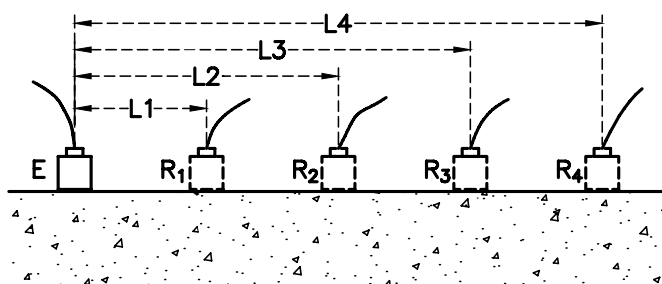


Figura 2.3 - Modo de transmissão indireto. Fonte: (NBR 8802 ,1994).

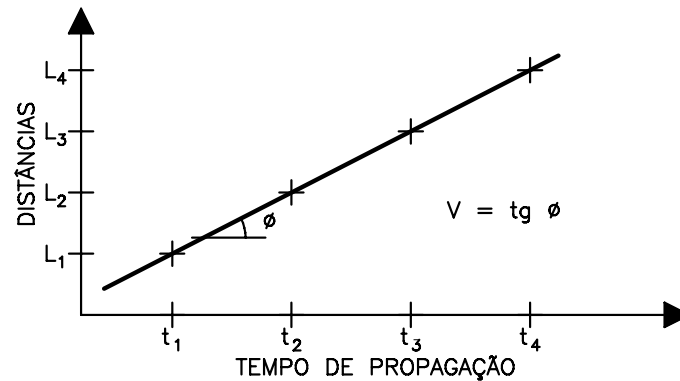


Figura 2.4 - Determinação da velocidade de propagação pelo modo de transmissão indireto. Fonte: (NBR 8802, 1994).

Este método também é recomendado por pela RILEM NDT1 (1972) assim como por normas internacionais como a BS 1881: Part 203 (1986) e a norma EN-ISO 8047 (1994). A ASTM C 597-2 (2003) apenas cita que se deve utilizar o modo de transmissão indireto quando não se tiver acesso à outra face de concreto, porém não descreve nenhum procedimento para a obtenção da velocidade para este modo de transmissão.

2.2.3 Tipos de ondas geradas

Quando impulsos mecânicos são aplicados a materiais sólidos, três diferentes tipos de ondas são geradas. Cada tipo de onda ocasiona um movimento específico das partículas no meio de transmissão, neste caso o concreto. Os tipos de ondas são conhecidas como ondas de compressão/tração (longitudinal, primárias, ou ondas P), ondas de distorção (transversal, secundárias, ou ondas S) e ondas de Rayleigh (de superfície ou ondas R), estas últimas se propagam ao longo da superfície de um sólido. No ensaio de ultra-som, estas ondas são produzidas por transdutores eletro-acústicos acoplados à superfície do concreto (Naik & Malhotra, 1991).

As ondas longitudinais geralmente são duas vezes mais rápidas que os outros dois tipos e têm a movimentação das partículas na mesma direção em que as ondas se propagam. As ondas transversais ou de cisalhamento têm as partículas movimentando-se perpendicularmente à direção de percurso da onda. As ondas de superfície ou Rayleigh têm percurso ao longo da superfície e têm as partículas movimentando-se em uma trajetória elíptica na superfície. Na Figura 2.5 é apresentado um esquema dos tipos de ondas citadas.

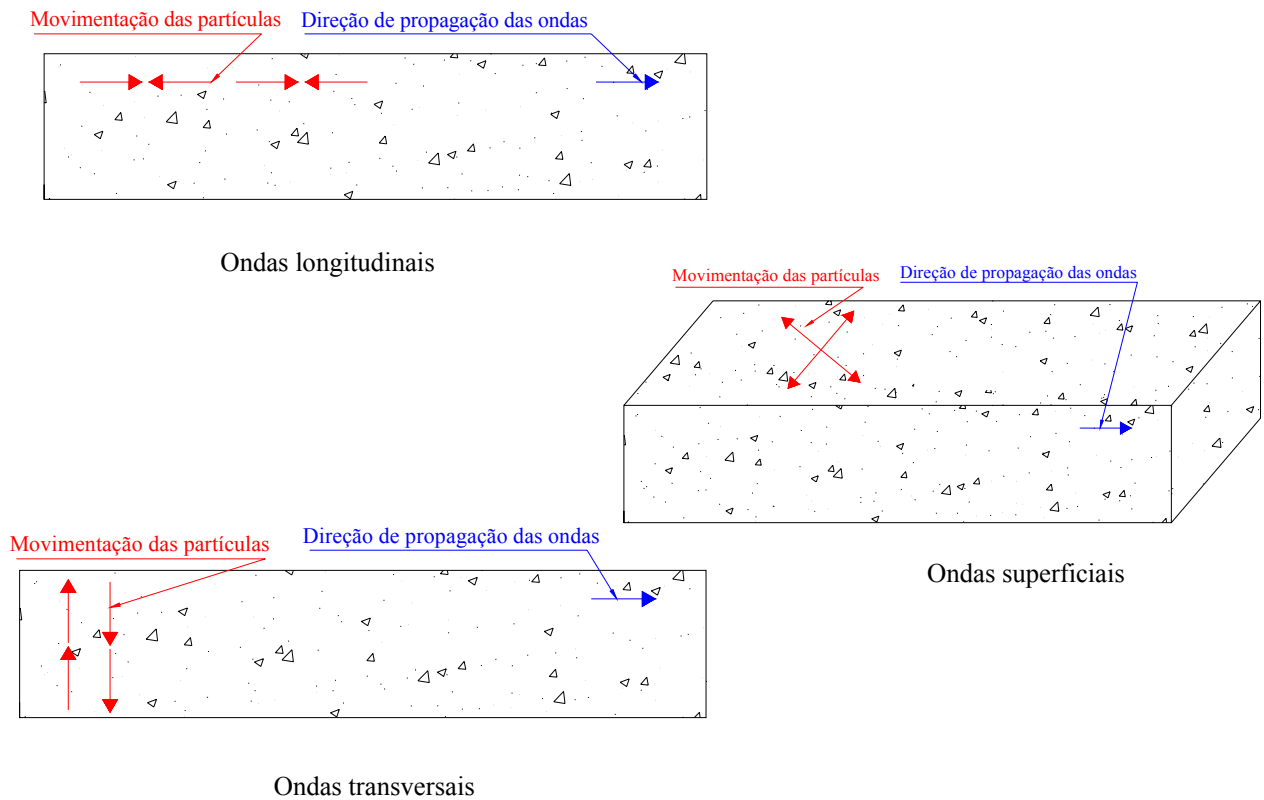


Figura 2.5 – Tipos de ondas geradas em um sólido: longitudinais, transversais e superficiais (Bungey, 1982 *apud* Meneghetti, 1999).

Na maioria das vezes os transdutores são projetados para gerar ondas longitudinais, que são preferidas em relação aos outros dois tipos de onda porque são as mais rápidas. Porém sempre ocorrem algumas ondas de cisalhamento e de superfície, mas que não chegam a causar interferência considerável (Meneghetti, 1999).

Em um elemento sólido isotrópico infinito, e elástico, a velocidade da onda P, V_p é relacionada ao módulo de elasticidade dinâmico, E , ao coeficiente de Poisson, ν , e a densidade do material, ρ , conforme apresentado na Eq. 2.1.

A onda S se propaga a uma velocidade mais lenta, V_s , dado por:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1 + \nu)}} \quad (2.2)$$

onde, G = módulo de elasticidade transversal.

A relação da velocidade da onda S para onda P depende do coeficiente de Poisson como segue:

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1+\nu)}} \quad (2.3)$$

Para um coeficiente de Poisson de 0.2, típico do concreto, esta relação é igual a 0.61. A relação da velocidade da onda R, V_r , para a velocidade da onda S é determinada pelo seguinte fórmula:

$$\frac{V_r}{V_s} = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (2.4)$$

Para um coeficiente de Poisson igual a 0.2, a velocidade da onda R é 92% da velocidade da onda S.

A Figura 2.6 mostra os resultados de uma análise de elementos finitos devido a resposta de um impacto a uma placa (Sansalone e Carino, 1986 apud Carino, 2001). A figura é uma amostra 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 aproximadamente no meio do caminho, próximo da parte de cima da placa (Carino, 2001).

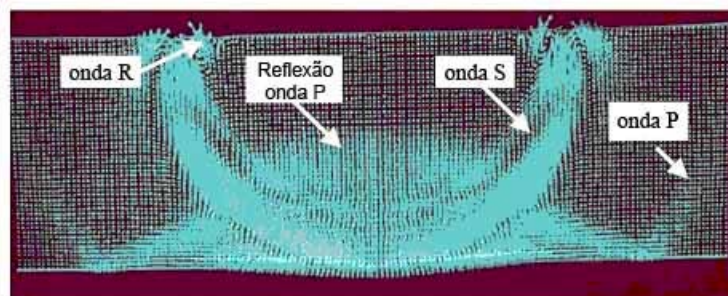


Figura 2.6 - Simulação de elementos finitos de impacto em uma placa. (Fonte: Sansalone e Carino, 1986 apud Carino, 2001)

2.2.4 Fatores de influência

As velocidades de ondas ultra-sônicas obtidas em determinada região de uma estrutura de concreto ou em corpos-de-prova podem ter pouco ou nenhum significado se não houver um programa específico que considere a ação das variáveis envolvidas (Hamassaki, 1986).

Quando a aplicação do ultra-som tiver como objetivo obter informações referentes a propriedades mecânicas do concreto (seja f_c , E , f_{ct} , entre outros), não há uma correlação única para a relação entre velocidade e resistência, devido existirem vários fatores que influenciam na velocidade.

2.2.4.1 Tipo e dimensão do agregado graúdo

Pesquisadores apontam que a relação entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas e a resistência à compressão varia com as características do agregado. Kaplan *apud* Hamassaki (1986) estudou vários tipos de agregados para um mesmo traço de concreto, visando avaliar sua influência na relação velocidade de propagação/resistência. A conclusão foi que concretos com semelhantes resistências à compressão podem ter diferentes velocidades de ondas ultra-sônicas em função do tipo de agregado utilizado.

Devido ao fato do agregado graúdo ser o maior constituinte do concreto, a velocidade de propagação através deste componente tem influência significativa no resultado final da velocidade de propagação através do concreto. Deere & Miller *apud* Sturup, Vecchio & Caratin (1984) estabeleceram a faixa de velocidade de diferentes tipos de rocha.

Também, Sturup, Vecchio & Caratin (1984) verificaram a influência da dimensão máxima do agregado, 20 e 40 mm na relação velocidade de pulso/resistência. A quantidade de cimento variou de 155 a 355 Kg/m³ e os corpos-de-prova foram testados aos 3, 7 e 28 dias de idade. Em todas as idades, o concreto confeccionado com agregado de dimensão maior apresentou resistência mais baixa para um dado nível de velocidade de pulso. Na Figura 2.7 estão apresentados os resultados.

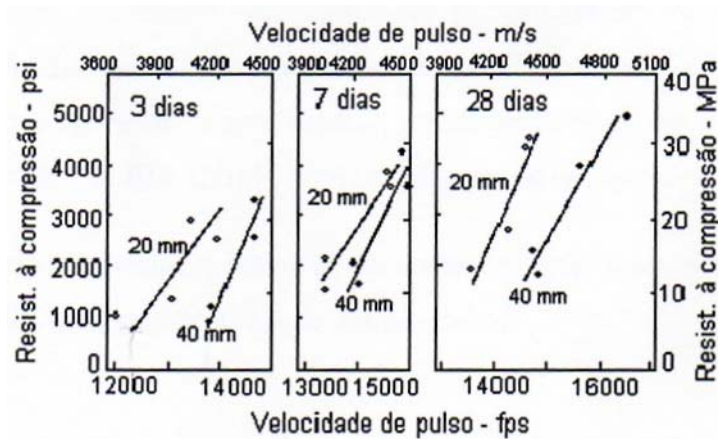


Figura 2.7 - Efeito do tamanho máximo do agregado na correlação entre a velocidade de pulso e a resistência (Fonte: Sturup, Vecchio & Caratin, 1984, p 219 *apud* Evangelista, 2002).

2.2.4.2 Proporcionamento da mistura

A influência devido ao proporcionamento da mistura na relação velocidade de propagação/resistência se dá através principalmente da relação volumétrica agregado-cimento.

Foi realizado um estudo por Sturup, Vecchio & Caratin (1984) da relação velocidade de pulso/resistência de cinco concretos contendo mesmos materiais em diferentes proporções. A relação água-cimento variou dentro da faixa 0,44 a 0,82 e relação agregado-cimento de 3,3 a 7,3. Com este estudo, os pesquisadores concluíram que para baixos níveis de resistência ou nas primeiras idades, o efeito do proporcionamento da mistura é menos significativo do que para altas resistências ou em idades posteriores. Os resultados indicaram que para uma dada velocidade de pulso, a resistência diminui com a redução da relação água-cimento. A Figura 2.8 apresenta os dados deste estudo.

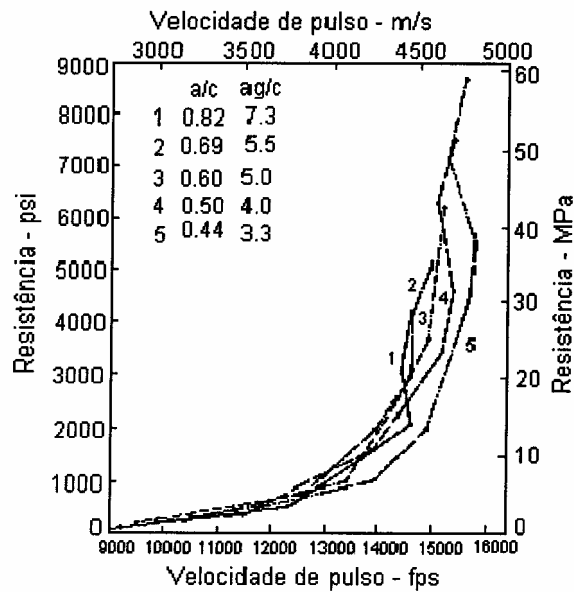


Figura 2.8 - Correlação entre a velocidade de pulso e a resistência à compressão do concreto para diferentes proporções a diferentes idades. (Fonte: Sturupp, Vecchio & Carantin, 1984, p 219 *apud* Evangelista, 2002).

As literaturas confirmam que através de mudanças na quantidade de agregado ocorre uma influência significativa na velocidade de pulso. Este fato pode ser explicado pelo fato de que o agregado possui módulo de elasticidade maior do que o da matriz. Os trabalhos de Elvery & Ibrahim (1976) confirmam tal interpretação.

A Figura 2.9 apresenta os dados de um estudo em que variou-se a relação agregado-cimento, mantendo-se constante a relação água-cimento.

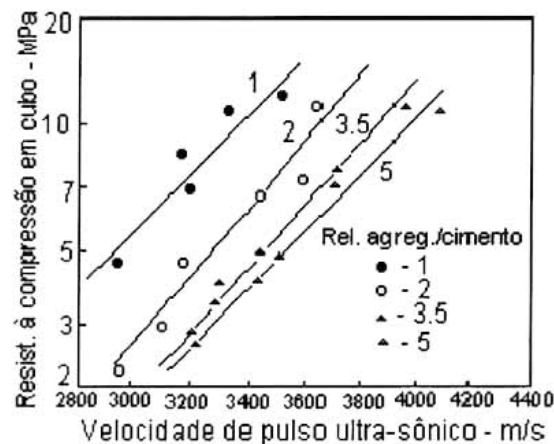


Figura 2.9 - Correlação entre a velocidade de pulso e a resistência à compressão (escala logarítmica), em concretos com diferentes relações agregado/cimento e fator $a/c = 0,45$ (Fonte: Elvery & Ibrahim, 1976, p 187 *apud* Meneghetti, 1999).

2.2.4.3 Tipo de Cimento

A Figura 2.10 (Evangelista, 2002) apresenta dois tipos de cimento CP III (M1) e CP V (M4) na busca da influência do tipo de cimento na velocidade de propagação da onda. Contudo verificou que quanto maior a relação água/cimento menor a velocidade de propagação dos pulsos de ultrassom. Aditivos que alteram o grau de hidratação do cimento podem influenciar no valor das medidas de velocidade. No entanto o ar incorporado parece não afetar os resultados.

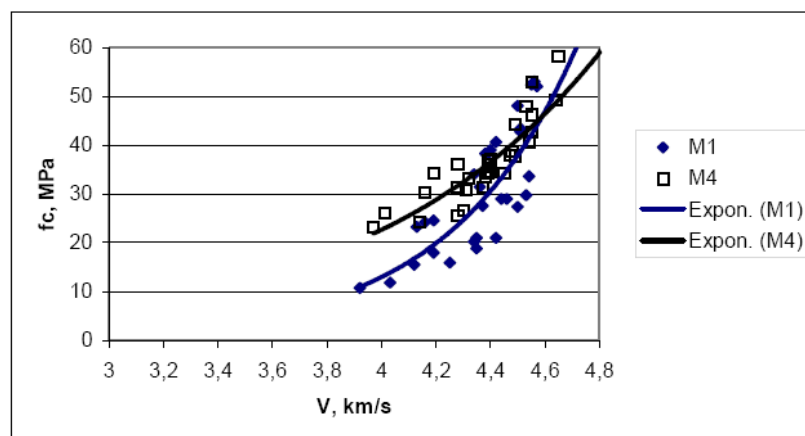


Figura 2.10 - Efeito do tipo de cimento na correlação entre a velocidade de pulso e a resistência à compressão. (Fonte: Evangelista, 2002)

2.2.4.4 Temperatura

O efeito da temperatura de cura sobre a velocidade de pulso é similar ao efeito do desenvolvimento da resistência do concreto. Os resultados dos testes realizados por Elvery & Ibrahim (1976), onde foram mantidos constantes o proporcionamento dos materiais (relação água-cimento de 0,45 e agregado-cimento de 5,0) estão apresentados na Figura 2.11.

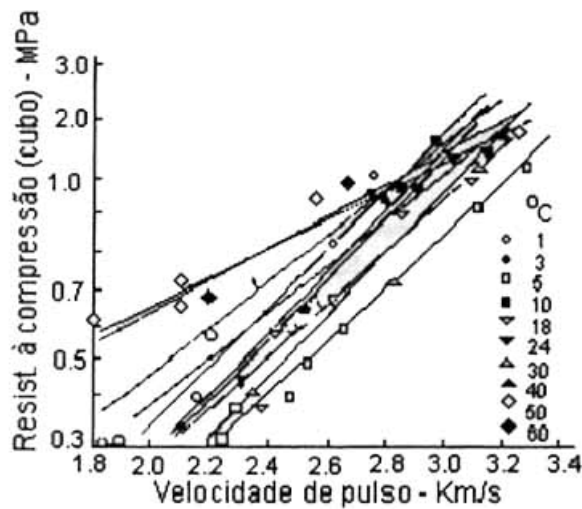


Figura 2.11 - Efeito da temperatura sobre a correlação entre a velocidade de pulso e a resistência ($a/c = 0,45$; $\text{agreg./cim.} = 5,0$). (FONTE: Elvery & Ibrahim, 1976, p 187 apud Meneghetti, 1999)

É possível concluir que nas faixas de temperatura que se tem em climas moderados é improvável que se tenha uma influência importante na velocidade dos pulsos, mas a temperaturas extremas podem refletir possíveis microfissuras internas em altas temperaturas e os efeitos da água congelada dentro do concreto a temperaturas muito baixas.

2.2.4.5 Umidade

A velocidade de pulso através do concreto saturado pode ser 5% mais alta do que no mesmo concreto na condição seca ao ar, embora esta influência seja menor para concretos de alta resistência do que para concretos de baixa resistência (ACI 228.1R-03). Um corpo de prova úmido mostra uma velocidade de pulso maior.

Os resultados dos testes realizados por Sturup, Vecchio & Caratin (1984) em pastas, argamassas e concretos disposto na Figura 2.12, ilustram o efeito da umidade.

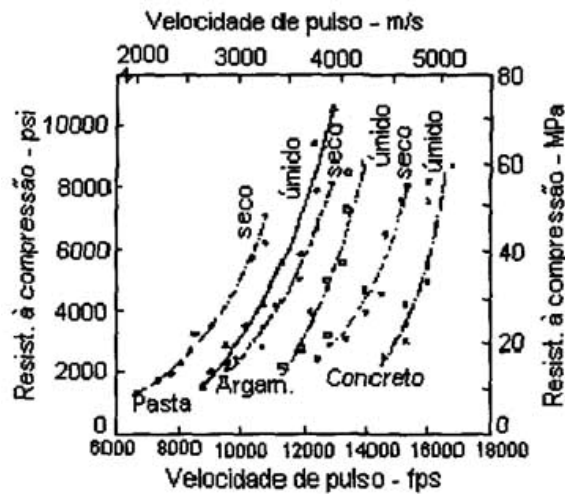


Figura 2.12 – Efeito da umidade sobre a correlação entre a velocidade de pulso e a resistência à compressão. (Fonte: Sturup, Vecchio & Caratin, 1984, p 223 apud Meneghetti, 1999)

2.2.4.6 Tamanho e forma do elemento estrutural

O tamanho e a forma do elemento não afetam a velocidade de propagação. No entanto, a equação utilizada para calcular a velocidade do ultra-som em materiais sólidos é válida somente para dimensões infinitas. Esta condição na prática fica atendida se a dimensão lateral do elemento em estudo foi pelo menos igual ao comprimento de onda do pulso transmitido. Valores inferiores reduzirão a precisão dos resultados.

2.2.4.7 Distância entre os transdutores

As velocidades de pulso não são geralmente afetadas pelo comprimento do percurso da onda, desde que não seja excessivamente pequeno, neste caso a natureza heterogênea do concreto se torna importante. Limitações físicas no equipamento medidor de tempo podem também introduzir erros onde pequenos comprimentos de percurso são envolvidos. A Figura 2.13 apresenta este resultado, na qual um corpo de prova foi reduzido no seu comprimento e foi realizado a medida da velocidade de pulso. Com isto, conclui-se que a velocidade medida diminui com o aumento do comprimento do percurso da onda.

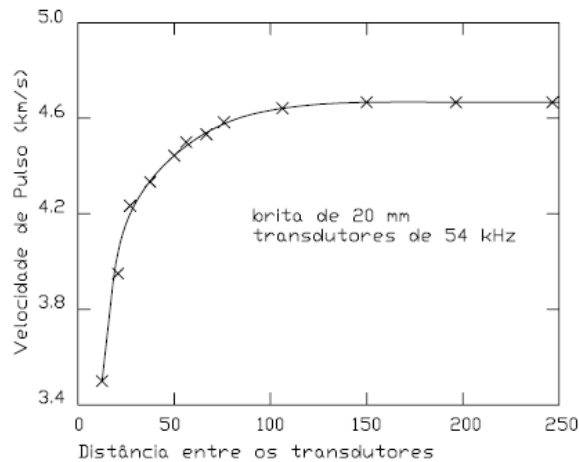


Figura 2.13 – Efeito do diminuição da distância entre os transdutores (Fonte: Bungey, 1982)

2.2.4.8 Presença de armaduras, fissuras ou vazios

No caso do concreto não apresentar armaduras, fissuras ou vazios, as ondas sonoras percorrem o menor caminho, isto é, uma linha reta entre os dois transdutores.

A presença de armadura, dependendo da sua posição, pode aumentar em até 40 % da velocidade obtida (ACI 228.1R-03). Se existem armaduras localizadas paralelamente ao caminho das ondas, dependendo da proximidade dos transdutores, as ondas podem transitar parte através do concreto e parte através do aço. Como a velocidade das ondas é maior no aço do que no concreto (1,2 a 1,9 vezes), o primeiro pulso a chegar no transdutor receptor percorre o concreto e o aço, o que acarreta um aumento da velocidade de propagação (Sturup, Vecchio & Caratin, 1984, RILEM NDT1, 1972).

A influência não é significativa caso a barra se encontre na posição transversal a dos pulsos e a quantidade de barras for pequena em relação à distância entre os transdutores. Se as barras estiverem paralelas ao caminho dos pulsos, e o seu diâmetro for superior a 10 mm, a influência torna-se significativa (Chung e Law, 1983).

Bungey (1989) cita que, nos casos onde não se pode evitar a presença das barras de aço, torna-se necessário fazer uma correção nos valores obtidos para que se possa estimar a velocidade de propagação no concreto quando as barras estão dispostas paralelas ou perpendiculares à direção de propagação. Ele propôs estabelecer uma relação entre a velocidade real do ultra-som no concreto (V) sem a influência da armadura, neste caso obtida através das médias das

velocidades fora da região de influência das barras de aço, com a velocidade medida dentro da região de influência da barra (V_m). Esta correção se daria através de um fator de correção “k” da seguinte maneira:

$$V = k_1 V_m \quad (2.5)$$

k_1 = relacionado à distância do transdutor à barra (a) ao percurso total de transmissão (L), podendo ser obtido pela expressão:

$$k_1 = \frac{V}{V_{s1}} + 2\left(\frac{a}{L}\right)\sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_{s1}}\right)^2} \quad (2.6)$$

onde: V_{s1} - velocidade de propagação da onda na barra de aço embebida no concreto

Valores em torno de 5100 a 5900 m/s para V_s são sugeridos na literatura para barras ao ar livre (Malhotra, 1991 e Bungey, 1989). Para barras introduzidas no concreto estas velocidades geralmente diminuem, sendo função do diâmetro da barra (Bungey, 1989).

Segundo Dornelles, Pinto e Padaratz (2004), a influência da armadura na velocidade de propagação do ultra som depende, além da distância do transdutor à barra (a/L), do diâmetro da barra conforme Figura 2.14.

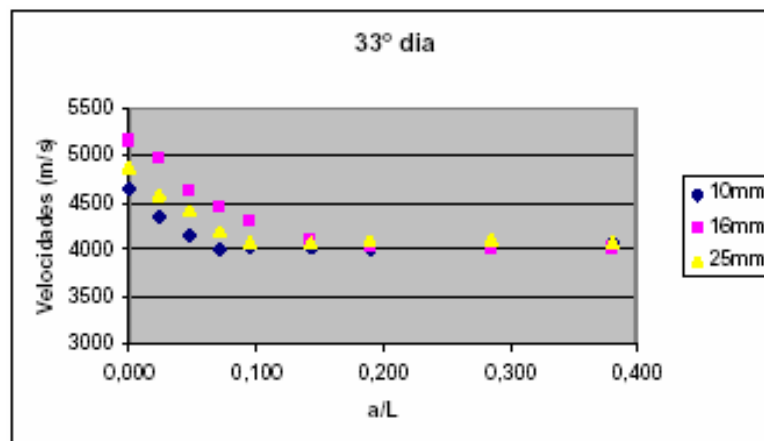


Figura 2.14 – Velocidade de propagação do ultra-som em função da distância a/L para um corpo de prova de 33 dias. (Fonte: Dorneles, Pinto e Padaratz, 2004).

As velocidades da onda nas barras de aço foram avaliadas diretamente a partir dos corpos de prova, obtendo-se os valores de 5550 m/s e 5650 m/s, para as barras com diâmetro 16 mm e 25 mm respectivamente (Dornelles, 2004).

Fissuras no caminho de propagação da onda também influenciam a velocidade obtida pois a amplitude e a direção da propagação dos pulsos são modificadas quando encontram uma fissura (Knab, Blessing & Clifton, 1983). Se a onda encontra uma fissura superficial, esta contorna a fissura, resultando num tempo de propagação maior e por conseqüência em uma velocidade aparente menor. O capítulo 3 apresenta em mais detalhes o efeito da fissura no tempo de propagação da onda.

2.2.5 Comprimento de propagação de onda, forma da peça e frequência do transdutor emissor

A RILEM NDT1 (1972) recomenda um comprimento mínimo para a propagação das ondas afim de evitar que transdutores muito próximos sejam influenciados pelos componentes do concreto:

- 100 mm para concreto com agregado máximo de 30 mm;
- 150 mm para concreto com agregado máximo de 45 mm.

A dimensão do agregado também deve ser inferior ao comprimento da onda (λ) para evitar redução da energia da onda e a possível perda de sinal no receptor (Bungey, 1989). Transdutores com frequência natural entre 20 kHz e 200 kHz são os mais adequados para uso no concreto, e estes podem ser de qualquer tipo, embora os de cristal piezo-elétrico sejam os mais usuais. Porém a escolha da frequência do transdutor (f) depende do tamanho do elemento estrutural a ser investigado, pois a distância percorrida não deve ser menor que o comprimento da onda (λ), sendo que:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2.7)$$

onde:

λ = comprimento da onda;

De acordo com a RILEM NDT1 (1972), ondas com frequências mais elevadas são atenuadas mais rapidamente do que as de frequências mais baixas. Segundo esta norma, dependendo das dimensões da peça analisada, a frequência mínima dos transdutores deve estar de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Recomendação da RILEM para frequência mínima do transdutor emissor de acordo com as dimensões da peça.

Comprimento (mm)	Frequência (kHz)	Dimensão transversal mínima do elemento (mm)
100-700	≥ 60	70
200-1500	≥ 40	150
>1500	≥ 20	300

2.2.6 Normas disponíveis

No Anexo A está apresentada uma comparação de algumas normas para realização dos ensaios de ultra-som.

2.3 ECO-IMPACTO

Em 1983, nos E.U.A, o Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) começou uma pesquisa em ensaios não destrutivos para a detecção de defeitos internos no concreto. A partir de uma revisão de métodos disponíveis, foi decidido procurar-se um método de teste baseado em ondas de tensão.

O maior sucesso na aplicação prática de métodos de onda de tensão para descoberta de falha no concreto foi usar o impacto mecânico para gerar o pulso de tensão. O impacto produz um pulso de energia que pode propagar-se profundamente em concreto. As primeiras aplicações de métodos de impacto aconteceram na geotecnia que buscavam avaliar a integridade de fundações de concreto e ensecadeiras (Çam, 2004). A técnica foi conhecida como o eco-sônico ou sísmico - método eco (ACI 228.2R). Os comprimentos destas estruturas de fundação permitiram separar a geração do impacto e a chegada do eco, e a determinação dos tempos de viagem (Lin, Sansalone e Carino, 1991b).

A pesquisa inicial no NIST proveu a base para a técnica e demonstrou sua capacidade para descoberta de falhas dentro de concreto tornando-se conhecida como o método de eco-impacto (Sansalone e Carino, 1986 *apud* Carino 2001). A resposta do impacto a peças mais curtas, como lajes e paredes, é mais complicada do que em peças longas (Sansalone e Carino, 1986 *apud* Carino 2001), porém o desenvolvimento do método do eco-impacto possibilitou a descoberta de falhas em estruturas de concreto relativamente finas.

A pesquisa envolveu uma combinação de simulações numéricas que usaram o método de elementos finitos e o estudo de defeitos conhecidos para chegar a um resultado satisfatório. Em 1987, a Professora Mary Sansalone, que havia participado do trabalho inicial da NIST como estudante de Ph.D, iniciou um amplo desenvolvimento de pesquisas utilizando o eco-impacto na Universidade de Cornell, resultando no primeiro instrumento patenteado de campo. Além disso, Sansalone e Streett (1997) produziram um livro resumo dos resultados analíticos de laboratório e campo nos procedimentos de estudos com diferentes aplicações do método. Este livro também provê diretrizes práticas para teste em campo. Nos anos noventa, o NIST e a Universidade de Cornell cooperaram no desenvolvimento de um método de teste a ser normalizado, que em 1998 foi adotado pela ASTM.

O sucesso rápido para este método de eco-impacto foi o resultado de uma combinação de diversos fatores: pesquisa de indivíduos com capacidades diferentes, disponibilidade de ferramentas de modelagem numéricas permitindo simular a propagação de onda de tensão sob condições diferentes de teste, o desenvolvimento de novos transdutores de deslocamento ideal para testes de eco-impacto, e a análise de frequência usada dos sinais registrados que simplificaram muito a interpretação dos resultados de teste. Finalmente, as capacidades básicas do método eram estabelecidas por uma combinação de estudos numéricos e acompanhadas do controle de falhas (Sansalone e Carino, 1988 *apud* Carino, 2001).

2.3.1 Princípio de Funcionamento

O método de eco-impacto está baseado no uso de ondas de tensão geradas por um impacto elástico. Um impacto mecânico de curta duração produzido pela batida de uma pequena esfera de aço contra o concreto é usado para gerar ondas de tensão que se propagam na estrutura e são refletidas através de falhas nas superfícies. Os deslocamentos de superfície causados por

reflexões destas ondas são captados por um transdutor-receptor, situado adjacente ao impacto. Os deslocamentos medidos são então avaliados no domínio da frequência, obtendo-se amplitudes correspondentes. Reflexões múltiplas de ondas de tensão entre a superfície de impacto, falhas, e/ou outras superfícies externas dão origem a ressonâncias passageiras que podem ser identificadas no espectro e usadas para avaliar a integridade da estrutura ou determinar o local de falhas.

O diagrama do método é mostrado na Figura 2.15.

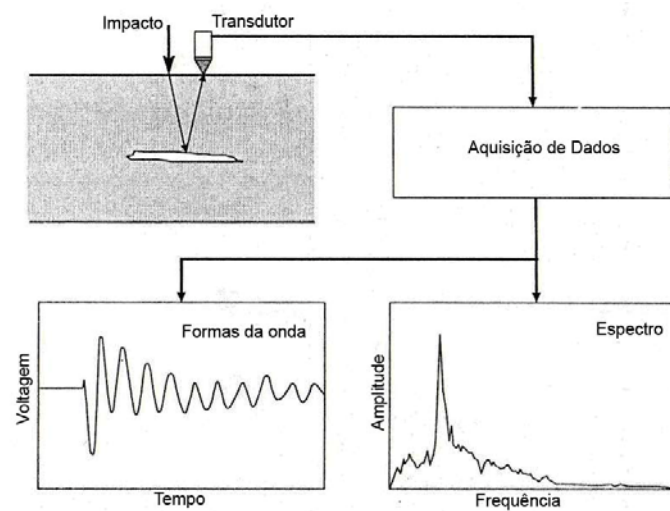


Figura 2.15 – Diagrama simplificado do método de Eco-impacto (Fonte: Sansalone, 1997).

2.3.2 Ondas de tensão

Ondas de tensão podem ser geradas por qualquer mecanismo capaz de produzir uma força que varia rapidamente com tempo, como um transdutor piezelétrico (método do ultra-som) ou a colisão de dois corpos sólidos (método eco-impacto). No teste de eco-impacto, ondas de tensão são geradas por um impacto de uma esfera de aço pequena (tipicamente 3 mm a 15 mm de diâmetro) contra a superfície de uma estrutura. Os parâmetros importantes que caracterizam o impacto são a duração ou tempo de contato do impacto, t_c , o diâmetro da esfera, D , e a energia cinética da esfera no impacto (Sansalone, 1997).

As características das ondas de tensão, geradas por um impacto elástico de uma esfera em um sólido, determinam a sua capacidade de propagação e assim a possível detecção de falhas. A variação da força de impacto com tempo, chamado de função de força-tempo, é representado

com precisão por uma meia curva de seno, como mostrado Figura 2.16. As durações (ou tempos de contato, t_c) provenientes do impacto das esferas de aço e a superfícies de concreto são pequenas, de aproximadamente 15 a 100 μ s (Sansalone, 1997).

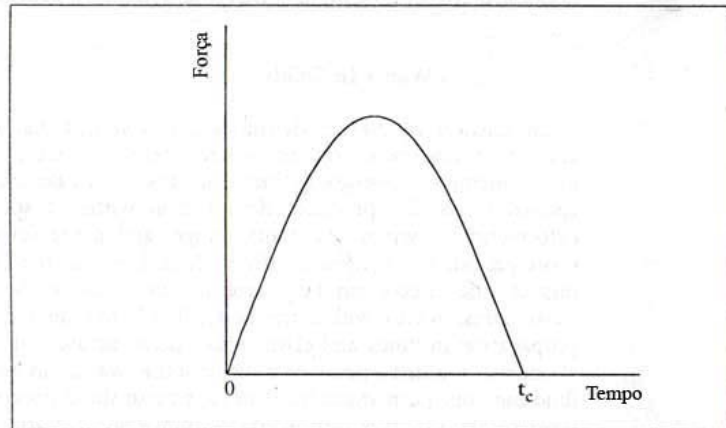


Figura 2.16 - Função de força-tempo para o impacto elástico de uma esfera em um sólido (Fonte: Sansalone, 1997).

Durante um impacto uma porção da energia cinética na esfera é transformada em energia de onda elástica no concreto. A força máxima é proporcional à energia cinética da esfera no impacto, e os deslocamentos das partículas nas ondas de tensão resultantes são proporcionais a esta força. O tempo de contato é uma função linear do diâmetro da esfera, e tem uma dependência muito fraca com a energia cinética.

2.3.2.1 Reflexão e Refração

Quando uma onda P ou S incide em uma superfície ocorre a sua reflexão. Como mostrado na Figura 2.17 (a), ondas de tensão podem ser propagadas ao longo de raios. A geometria dos raios de reflexão é análoga a de raios de incidência, quer dizer, o ângulo de reflexão de qualquer raio é igual ao ângulo de incidência daquele raio. Quando ocorre um limite entre dois meios diferentes, só é refletida uma porção da onda de tensão, com o resto penetrando no médio subjacente (refração de onda) (Carino, 2004). O ângulo de refração é uma função do ângulo de incidência e da relação entre as velocidades da onda, V_2/V_1 , dos meios é determinado pela lei de Snell:

$$\sin\beta = \frac{V_2}{V_1} \sin\theta \quad (2.8)$$

De acordo com Carino (2004), quando a batida provoca um ângulo oblíquo, ondas de tensão distintas podem mudar o modo de propagação das ondas. Dependendo do ângulo de incidência, a onda P pode ser refletida parcialmente. A onda S se propaga a uma velocidade mais baixa que a onda P, logo, refletirá e refratará ângulos θ_s e β_s (determinado usando lei Snell) menores que os ângulos de reflexão e refração da onda P, conforme apresentado na Figura 2.17 (b).

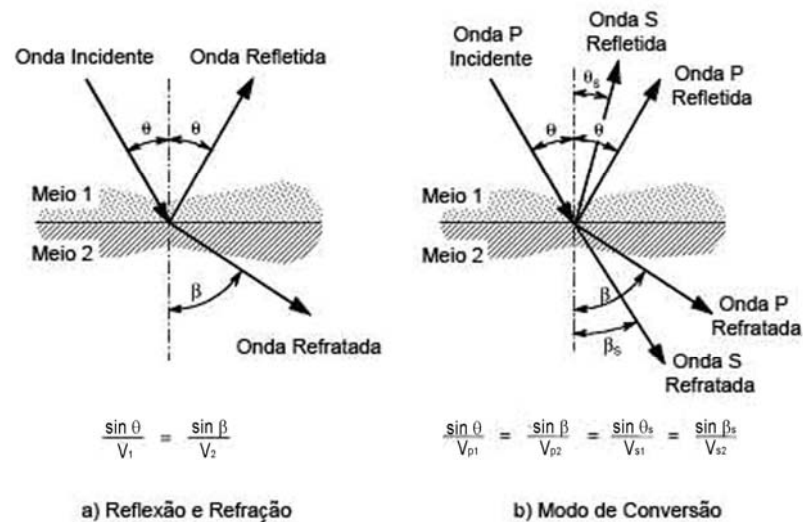


Figura 2.17 - Comportamento de uma onda P incidente em uma interface dois meios diferentes: (a) reflexão e refração; (b) conversão de modo. (Fonte: Carino, 2004).

As amplitudes das ondas refletidas dependem da combinação das impedâncias acústicas, do ângulo de incidência, da distância de uma interface da fonte do pulso, e da atenuação ao longo do caminho de onda. A impedância específica acústica é o produto da velocidade da onda e a densidade do material, conforme a expressão abaixo:

$$Z = \rho \times V_p \quad (2.9)$$

onde:

Z = impedância acústica ;

ρ = densidade material;

V_p = velocidade da onda

Seguem abaixo valores aproximados de Z para alguns materiais (Carino, 2004):

Tabela 2.2 – Resumo Impedâncias Acústicas. (Fonte: Carino, 2004).

Material	Densidade (Kg/m ³)	Velocidade da onda P (m/s)	Impedância Acústicas kg/(m ² /s)
Ar	1.205	343	0.413
Concreto	2300	3000–4500	6.9–10.4 x 10 ⁶
Granito	2750	5500–6100	15.1–16.8 x 10 ⁶
Cálcario	2690	2800–7000	7.5–18.8 x 10 ⁶
Mármore	2650	3700–6900	9.8–18.3 x 10 ⁶
Quatizito	2620	5600–6100	14.7–16.0 x 10 ⁶
Solo	1400 -2150	200–2000	0.28–4.3 x 10 ⁶
Aço	7850	5940	46.6 x 10 ⁶
Água	1000	1480	1.48 x 10 ⁶

A amplitude da reflexão é uma função do ângulo de incidência e é máxima quando este ângulo é 90° (incidência normal). Para incidência normal o coeficiente de reflexão, R , é dado pela seguinte fórmula (Krautkrämer e Krautkrämer, 1990 *apud* Carino, 2004):

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.10)$$

Assim, quando uma onda de tensão que viaja pelo concreto atinge uma interface com ar há quase uma reflexão total à interface.

O coeficiente de reflexão dado pela Eq. (2.10) pode ser negativo ou positivo dependendo dos valores relativos das impedâncias acústicas dos dois materiais. Se $Z_2 < Z_1$, como no caso de ma interface de concreto-ar, o coeficiente de reflexão é negativo. Isto significa que o sinal da onda refletida é oposto ao sinal da tensão na onda incidente. Assim uma onda P incidente com tensão de compressão refletiria como uma onda P com tensão de tração. Se $Z_2 > Z_1$, na caso de uma interface concreto-aço, o coeficiente de reflexão é positivo e não há nenhuma mudança no sinal da tensão. Neste caso, uma onda P incidente com tensão de compressão refletiria uma onda também tensão de compressão. Estas diferenças são importantes para distinção da interface entre o concreto-ar e a interface de concreto-aço (Cheng e Sansalone, 1993b).

2.3.2.2 Instrumentação

O teste do eco-impacto resulta em três componentes básicos:

- um instrumento mecânico de impacto capaz de produzir impactos de curta duração (Figura 2.18), sendo que esta duração pode ser variada,
- um receptor de alta fidelidade para medir a resposta da superfície,
- um sistema de aquisição de dados de sinal para análise do sistema de captura, processamento, e registro da forma da onda de movimento de superfície.



Figura 2.18 - (Esquerda) Esferas de aço para obter impactos com diferente tempos de contato; (Direito) Esferas de aço acopladas a hastes (Fonte: Carino, 2001).

Para medir o movimento de superfície com precisão, o transdutor tem que ser colocado efetivamente junto da superfície de concreto. Para a maioria dos transdutores, algum tipo de graxa é usado como material de acoplamento. Sansalone e Carino (1986) *apud* Carino (2001) usaram uma tira fina de couro como junção do transdutor. Esta tira macia conforma a textura da superfície irregular e transfere o movimento de superfície ao elemento de piezelétrico. Esta aproximação reduz o tempo preciso do teste. Porém os transdutores mais modernos não precisam de acoplante, pois obtêm bons resultados sem os mesmos.

As distâncias de posicionamento dos transdutores e do impactador é de forma manual, podendo variar conforme o impacto da esfera de aço.

2.3.3 Utilização do Eco-impacto

Segundo Carino (2001) e Jaeger, Sansalone e Poston (1996), o método de eco-impacto teve êxito para descoberta de uma variedade de defeitos, como vazios, porosidade, delaminações expostas e revestimento de lajes.

A aplicação do método foi estendida a elementos prismáticos, como pilares e vigas e foi descoberto que a reflexão no perímetro destes elementos causa modos complexos de vibração (Lin e Sansalone, 1992a, 1992b, 1992c). A Figura 2.19 apresenta um exemplo das formas associadas com os modos de vibração de uma viga quadrada ou pilar (Lin e Sansalone, 1992b). Estes modos resultam em um espectro de amplitude com muitos cumes, e a profundidade do elemento não é relacionado à frequência dominante no espectro. Não obstante, foi mostrado que ainda assim podem ser descobertas falhas (vazios, abertura e porosidade) dentro de vigas e pilares, desde que estes modos de vibração sejam levados em consideração (Lin e Sansalone, 1992a).

Para evitar as complexidades associadas com estes modos de seção, a menor dimensão lateral da estrutura deve ser pelo menos cinco vezes a espessura (Sansalone e Streett, 1997).

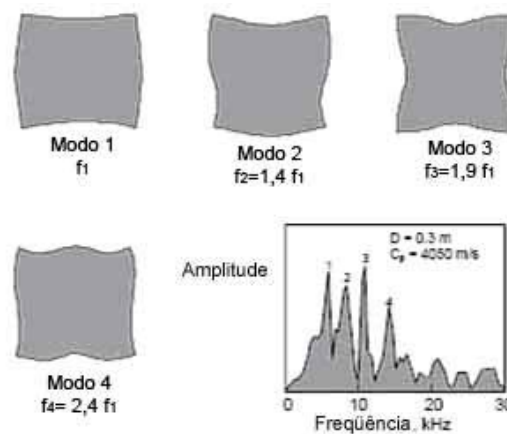


Figura 2.19 - Os primeiros 4 modos correspondem ao espectro de amplitude experimental para sólido de 0.3 m (Fonte: Lin e Sansalone, 1992b).

2.3.4 Princípio da frequência

O desenvolvimento fundamental que conduziu o sucesso do método de eco-impacto foi o uso de análise do domínio das frequências em vez do domínio de tempo e a análise das formas de onda registradas (Sansalone e Carino, 1986 *apud* Carino, 2001).

O princípio de análise de frequência é ilustrado na Figura 2.20. A onda P produzida pelo impacto sofre reflexões múltiplas entre a superfície de teste e a interface refletida. Cada tempo que a onda P chega à superfície de teste causa um deslocamento característico. Assim a forma da onda tem um padrão periódico que depende da distância de viagem de ida e volta da onda P.

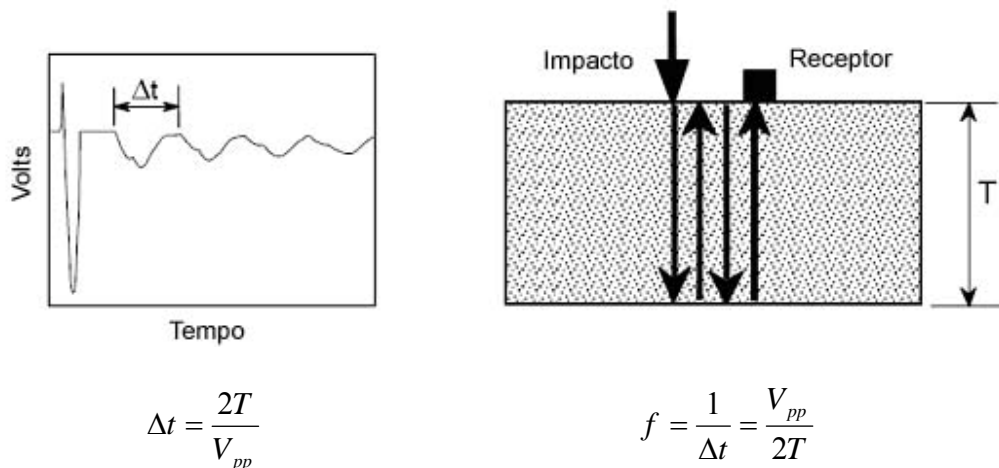


Figura 2.20 - Princípio de análise de frequência: a forma da onda de domínio de tempo tem um padrão periódico devido à chegada da onda P que sofre reflexões múltiplas entre o topo e fundo da placa; a frequência de chegada da onda P está diretamente relacionada à espessura da placa. (Fonte: Carino, 2001).

Se o receptor está perto do ponto de impacto, a distância de viagem de ida e volta é $2T$, onde T é a distância entre a superfície de teste e interface refletida.

Como mostrado na Figura 2.20, o intervalo de tempo entre a chegada sucessiva do múltiplo da onda P refletida é a distância de viagem dividida pela velocidade da onda. A frequência, f , da chegada da onda P é o inverso do intervalo de tempo e é determinado pela relação:

$$f = \frac{V_{pp}}{2T} \quad (2.11)$$

onde:

T = profundidade da interface refletida;

V_{pp} = Velocidade da onda na espessura da placa;

Se o objeto de teste é uma placa sólida, a frequência é calculada de acordo com Eq. (2.11). Esta equação (2.11) é a relação básica para interpretar os resultados de testes de eco-impacto. Nas primeiras pesquisas de desenvolvimento do método de eco-impacto, foi admitido que a velocidade de onda pela espessura da placa era igual à velocidade da onda P em um grande sólido, como dado pela Eq. (2.11) (Sansalone e Carino, 1986 *apud* Carino, 2001).

No desenvolvimento do método, Sansalone e Carino, 1986 *apud* Sansalone, 1997 observaram uma discrepância de 5 % na obtenção da velocidade da onda P em relação a velocidade obtida com a utilização do ultra-som. Esta diferença está associada a um modo de vibração da placa excitada pelas múltiplas reflexões da onda P, com isto introduzindo deslocamentos adicionais. A Figura 2.21 apresenta os modos de vibração da placa de expansão e contração.

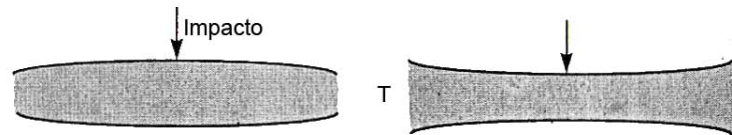


Figura 2.21 – Impacto e vibração da placa (Fonte: Sansalone, 1997).

Estudos subseqüentes e mais rigorosos mostraram que a velocidade da onda aparente que relaciona a frequência e espessura da placa é aproximadamente 96% da velocidade da onda P, quer dizer, $V_{pp} = 0,96 V_p$ (Lin e Sansalone, 1997), ou seja:

$$f_1 = \frac{0,96V_{pp}}{2T} \quad (2.12)$$

Lin e Sansalone, 1992b, 1992c estudaram elementos com outros tipos de seção transversal e sugeriram que a expressão 2.12 deve ser generalizada para:

$$f_1 = \frac{\beta V_{pp}}{2T} \quad (2.13)$$

β – fator de forma determinado pela geometria da peça, como exemplo, para uma seção quadrada, este valor de β é de 0,87.

A análise da frequência dos resultados de eco-impacto tem como objetivo determinar as frequências dominantes na forma da onda registrada. Isto é realizado usando a série de Fourier para transformar a forma do pulso registrado em domínio de frequência (Bracewell, 1978 *apud* Carino, 2001). A transformação resulta em um espectro de frequências das ondas do pulso.

Para estruturas de placas a frequência de espessura normalmente será o cume dominante no espectro. O valor do cume, frequência no espectro de amplitude, pode ser usado para determinar a profundidade da reflexão.

A distância entre o ponto de impacto e transdutor é importante. Se a distância for grande, a resposta refletida não é dominada pela onda P, e a relação simples expressa pela Eq. (2.11) não se aplica. Se a distância for muito pequena, a resposta é dominada pelo efeito da onda de superfície. Baseado em uma série de estudos analíticos, é recomendado, uma distância de 0,2 a 0,5 da profundidade de falha para dar resultados aceitáveis (Carino *et al.* 1986b *apud* Carino, 2001). Sansalone e Streett (1997) recomendam um espaçamento menor que 40% da profundidade.

2.3.5 Duração do Impacto

O impacto é o ponto fraco para o sucesso do teste de eco-impacto. A idéia básica do teste é criar uma vibração ressonante que corresponde ao modo de espessura. Para excitar a espessura, o pulso tem que conter a correta frequência componente. A Figura 2.22 apresenta um esquema do 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 (Sansalone, 1997). Como mostrado nesta figura, a relação de força-tempo para o impacto pode ser aproximada como uma curva de seno de meio-ciclo, e a duração do impacto é o tempo de contato. O tempo de contato é uma função linear do diâmetro da esfera, ou seja, quanto maior o diâmetro da esfera maior é o tempo de contato.

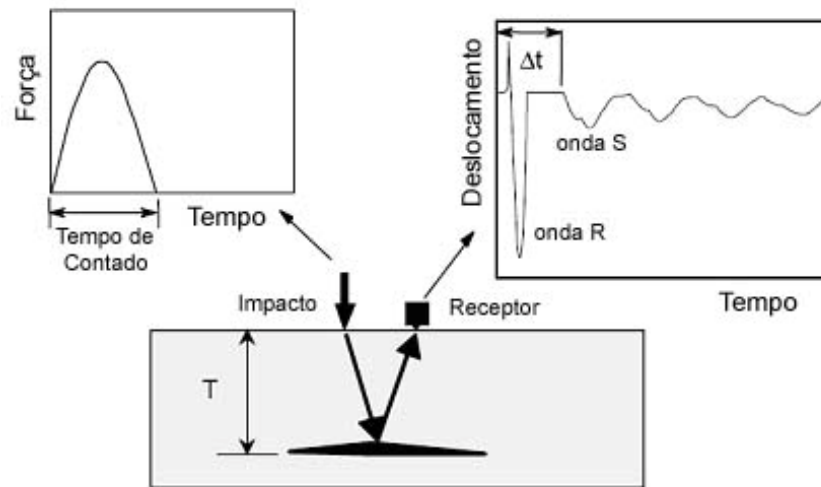


Figura 2.22 - O método de impacto-eco: impacto mecânico é usado para gerar ondas de tensão e um receptor próximo ao ponto de impacto mede o movimento de superfície resultante. (Fonte: Carino, 2001)

Ondas de tensão geradas pelo impacto são compostas de uma larga distribuição de frequências, e esta distribuição é determinada pela força-tempo do impacto. A distribuição da amplitude e das frequências em ondas de tensão, produzidas pelo impacto de uma esfera em um sólido com duração t_c , são mostrados na Figura 2.23. A frequência componente contida na absorção do pulso pode ser determinada pela transformada de Fourier da curva de seno de meio-ciclo.

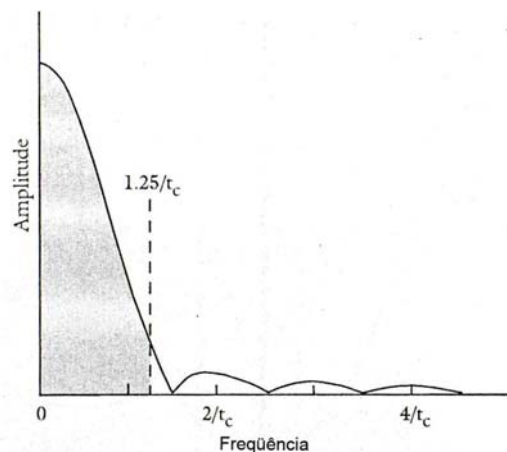


Figura 2.23 – Distribuição de frequências correspondente à relação força-tempo. (Fonte: Sansalone, 1997)

Assim com as diminuições de tempo de contato, a distância das freqüências aumentam, mas as amplitudes dos componentes de freqüência diminuem. Sansalone (1997) estabelece uma relação entre diâmetro da esfera de aço, tempo de contato e frequência máxima conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Relação entre diâmetro da esfera (impactador) com tempo contato e freqüência. (Fonte: Sansalone, 1997).

Diâmetro Esfera (mm)	Tempo de contato (μ s)	Frequência máxima (kHz)
5	22	57
6,5	29	43
8	35	36
9,5	42	30
11	48	26
12,5	55	23

2.3.6 Normas Disponíveis

2.3.6.1 ASTM Test Método C 1383

Em 1998, a ASTM adotou um método de teste no uso do eco-impacto para medir a espessura de placas de concreto. Neste caso, uma placa é definida como uma estrutura ou porção de uma estrutura com dimensões laterais de pelo menos seis vezes a espessura.

A ASTM C 1383 inclui dois procedimentos:

- Procedimento A: mostrado em Figura 2.24 (a), é usado para medir a velocidade da onda P no concreto. Esta medida é baseada no tempo de propagação da onda P entre dois transdutores a uma distância conhecida. Neste procedimento a duração do impacto deverá ser de $30 \pm 10 \mu$ s (hastes de 5 a 8 mm) e a distância entre os transdutores e o impacto de 150 ± 10 mm.
- Procedimento B (Figura 2.24 (b)): é usado para determinar a espessura da placa ou velocidade de propagação da onda através da freqüência obtida pelas ondas de tensão. A espessura, ou velocidade, pode ser obtida utilizando a equação 2.13.

Nota-se que a velocidade da onda P obtida através de Procedimento A é multiplicada por 0.96 quando usado na Eq. (2.13) no caso de placas, este fator multiplicador, β , é relacionado com a

forma geométrica da peça conforme descrito no item 2.4.4. No caso de uma peça retangular este coeficiente β é igual a 0,87.

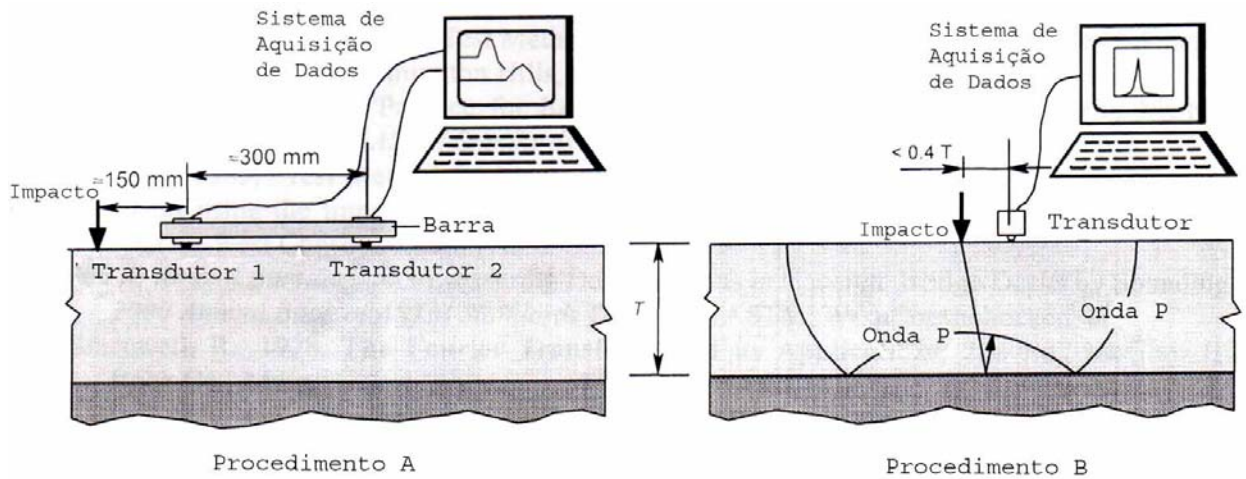


Figura 2.24 – Procedimento para medir espessuras de placas de acordo com ACTM C 1383: Procedimento A é usado para determinar a velocidade da onda P e Procedimento B é usado para determinar a frequência da espessura. (Fonte: Carino, 2001).

CAPÍTULO 3. NÃO-HOMOGENEIDADE DO CONCRETO

3.1 HOMOGENEIDADE DO CONCRETO

De acordo com Castro (2000), “O conceito de homogeneidade do concreto de um elemento estrutural está diretamente relacionado à distribuição uniforme dos materiais componentes do concreto neste elemento”. A homogeneidade do concreto em elementos estruturais pode ser função do “processo de produção do concreto” (mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura), como também pode ser proveniente de manifestações patológicas oriundas do tempo, carregamento excessivo, entre outros.

Quando no processo de produção ocorre falha em qualquer fase ou tarefa, o elemento estrutural poderá apresentar manifestações patológicas, ou seja, vazios, formação de ninhos de pedra, segregação do concreto, aberturas etc. Estas manifestações também podem ser oriundas de fenômenos de deterioração como: corrosão, reação álcali-agregado e carregamento excessivo. Em alguns casos estas anomalias podem se tornar uma ameaça à garantia da qualidade do elemento estrutural, impondo restrições à durabilidade e desempenho estrutural.

3.2 CAUSAS DA NÃO-HOMOGENEIDADE

Há diversas causas para a ocorrência de não-homogeneidades no concreto. Abaixo serão tratadas algumas das causas deste problema.

O concreto é um dos materiais mais utilizados na produção de estruturas pela indústria da construção civil. Entretanto, a qualidade dos materiais componentes e o uso inadequado destes materiais na produção do concreto influenciam diretamente no desempenho dos elementos estruturais (Castro, 2000).

Existe uma série de erros de execução que podem afetar mais a resistência e ocasionar falta de uniformidade na mistura, com o aparecimento de aberturas, vazios, bolhas, desprendimentos, etc. A maior parte dos erros e descuidos no concreto corresponde às fases de aplicação e cura do mesmo.

Um fator relevante é o uso de fôrmas convencionais de madeira ou metal que podem ocasionar efeitos indesejáveis no concreto produzindo vazios, alvéolos, ondulações, deformações entre outros. Este fato ocorre devido ao fato de que, junto a uma barreira pode-se formar uma camada de pasta e argamassa com qualidade inferior às camadas internas do concreto devido a elevação localizada da relação água/cimento.

Além das causas das manifestações patológicas, anteriormente citadas, existem outras decorrentes de execução e que podem ser consideradas como consequência de falta de fiscalização na limpeza; emprego de fôrmas sujas e com restos de argamassa ou pasta de usos anteriores.

3.3 ABERTURAS

Devido à aplicação de cargas repetidas, aberturas podem aparecer na superfície e se propagar até limites que levem ao colapso da estrutura. Quanto mais profundas forem as aberturas, maior será a concentração de esforços induzida por estas. Devido à presença de aberturas, as tensões internas aumentam, por causa da diminuição da inércia da seção fissurada, podendo diminuir a níveis menores do que a resistência de projeto (Issa e Debs, 2005).

Aberturas ocupam o segundo lugar entre os defeitos mais comuns na construção civil, perdendo apenas para os problemas relacionados com umidade.

O estudo realizado por Dal Molin (1988) das manifestações patológicas mais incidentes entre os 1615 casos atendidos pela Fundação de Ciência e Tecnologia CIENTEC no período de 1977 a 1986 pôde constatar que 66 % dos casos atendidos eram casos de fissuração. Outra pesquisa, realizada por Reygaerts, Gasper e Dutordir (1976) *apud* Figueredo (1989) na Bélgica entre 1976 e 1977 chegou a percentuais de ocorrência similares. A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos resultados apresentados por estes dois autores em termos de porcentagens de manifestações patológicas.

Tabela 3.1 – Resumo das manifestações patológicas encontradas.

Estudo	Umidade	Fissuração	Deslocamento	Degradação da superfície	Outros
Dal Molim (1988)	10 %	66 %	8 %	-	16 %
Figueredo (1989)	27 %	12 %	16 %	11 %	34 %

As manifestações patológicas estão freqüentemente ligada a falhas no projeto ou, até mesmo, à falta de projeto. É durante a sua elaboração que grande parte das manifestações patológicas pode ser prevenida, evitando-se gastos futuros com recuperação. Devem ser observados os seguintes quesitos básicos:

- Dimensionamento adequado;
- Proteção contra agentes químicos;
- Projeto de impermeabilização;
- Plano de manutenção;
- Especificação de produtos adequados;
- Vida útil prevista compatível com o tipo e utilização da estrutura.

Diante dos fatos é possível afirmar que a presença de aberturas é um fator importante na redução da vida útil das estruturas.

A adoção de uma estratégia de manutenção preventiva na estrutura (fluxograma da Figura 3.1) é fundamental para garantir uma maior durabilidade, evitando dispendiosas intervenções em estágios de deterioração mais avançados.

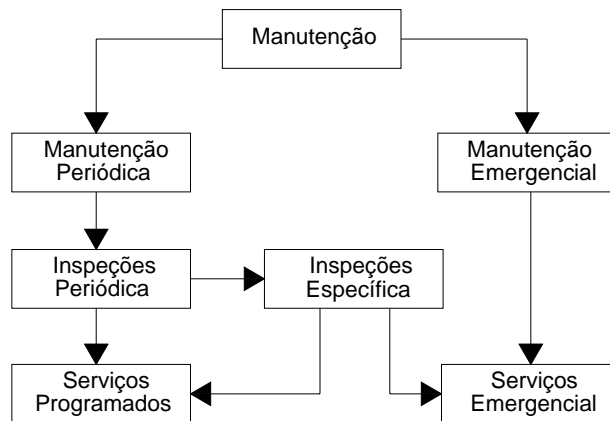


Figura 3.1 – Fluxograma de manutenção e inspeções.

A manutenção preventiva envolve menores gastos do que a manutenção emergencial. De acordo com Helene (2003), pode-se afirmar que as correções serão mais duráveis, mais efetivas, mais fáceis de executar e muito mais baratas quanto mais cedo forem realizadas.

Algumas aberturas, dependendo da largura máxima e do ambiente a que estão expostas, não chegam a afetar a durabilidade e o desempenho estrutural do componente de concreto fissurado. A NBR 6118 (2003) considera a abertura como nociva quando sua largura, na superfície do concreto, ultrapassar os valores apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura em função das classes de agressividade ambiental. Fonte: NBR 6118 (2003).

Classe de Agressividade Ambiental	Largura da abertura Máxima Característica
Fraca	0,4 mm
Moderada ou Forte	0,3 mm
Muito Forte	0,2 mm

3.3.1 Aberturas na Superfície do concreto

Uma abertura na superfície é definida como qualquer fresta visível na superfície. As aberturas de superfície podem ser perpendiculares à superfície, inclinadas, e curvadas, como mostrado na Figura 3.2.

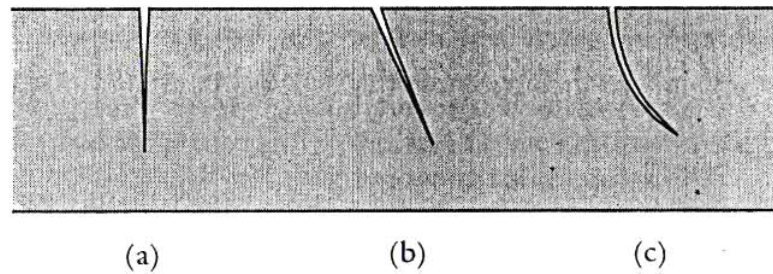


Figura 3.2 – Geometrias de aberturas de superfície: (a) perpendicular, (b) inclinada e (c) curva. (Fonte: Sansalone 1997)

Superfícies com aberturas são encontradas em todos os tipos de estruturas de concreto. Para determinar os efeitos provocados na estrutura é necessário estimar a profundidade das mesmas. Problemas de durabilidade são freqüentemente a principal preocupação quando existem aberturas. Estas permitem a penetração de água no concreto e podem causar corrosão na armadura ou aço de protensão. Em tanques, túneis lineares, e barragens, este tipo de fenda pode provocar vazamentos e perda da integridade estrutural.

Um dado imprescindível para o conhecimento da causa de uma abertura, bem como para a escolha do material mais adequado de correção é a movimentação verificada na sua largura ou comprimento.

3.3.1.1 Monitoramento de aberturas

Em Usinas Hidrelétricas é comum o monitoramento de aberturas existentes para avaliar se há necessidade de tratamento. Alguns aparatos simples podem ser utilizados para este fim, tais como sensores de lâminas de vidro, pinos metálicos ou medidores triortogonais mecânicos.

- Lâminas de vidro

O aparato com lâminas de vidro é confeccionado com três elementos de vidro, com duas lâminas menores coladas na extremidade de uma lâmina maior.

Conforme mostrado na Figura 3.3, o aparelho é fixado em ambos os lados da abertura, de modo a centralizá-la. Desta maneira, se houver alguma atividade da abertura, a lâmina de vidro se romperá.

O local de implantação dos aparelhos deverá ser limpo, ficando isento de graxas, pó e materiais que possam impedir uma boa aderência entre o aparelho e a parede.

Este procedimento possibilitará uma verificação simples da atividade das aberturas sem, contudo, dar idéia de sua direção e profundidade.

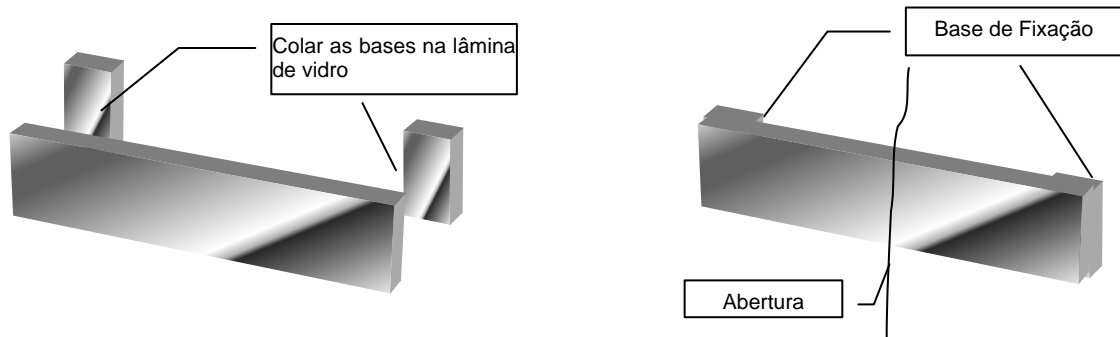


Figura 3.3 – Instalação de placas de vidro para monitoramento de aberturas.

Uma variação deste aparato, também confeccionado com vidro pode dar uma resposta mais completa. O aparelho é semelhante ao anterior, com a diferença que um dos lados é marcado com uma ranhura em forma de cruz, em ambas as placas (inferior e superior), para determinar os deslocamentos (horizontal e vertical). Neste caso, o lado marcado ficará livre.

O procedimento de fixação é idêntico ao anterior, tomando-se o cuidado para que, quando da fixação, as ranhuras em forma de cruz fiquem perfeitamente sobrepostas e livres para movimentação, fazendo com que a leitura inicial seja zerada.

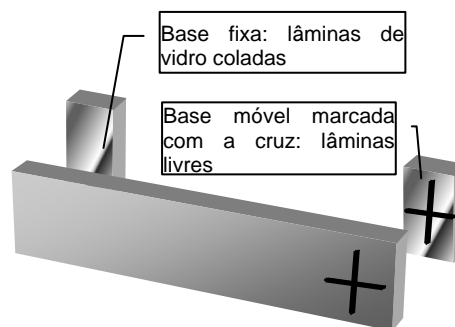


Figura 3.4 – Instalação de placas de vidro com cruz para monitoramento de aberturas.

- Pinos metálicos

Outra possibilidade é a utilização de pinos metálicos, colados ou fixados diretamente em ambos os lados da abertura, centralizando-a, conforme a Figura 3.5.

Após a fixação dos pinos, é realizada a leitura da distância entre eles (leitura inicial), através de um paquímetro. Periodicamente, são realizadas novas leituras com o paquímetro, e calculadas as variações em relação à leitura inicial. Este procedimento possibilita uma verificação da atividade das aberturas, fornecendo a magnitude da sua variação.

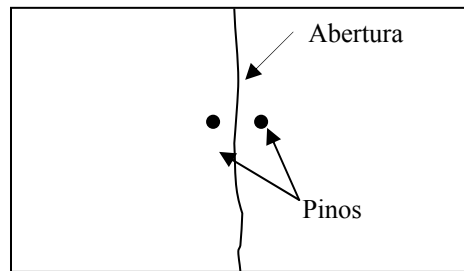


Figura 3.5 – Instalação de pinos metálicos para monitoramento de aberturas.

- Medidor triortogonal mecânico

Outra forma de medir a movimentação da abertura é a instalação de um medidor triortogonal mecânico. Este equipamento é mais completo podendo medir o deslocamento nas três direções ortogonais necessitando de um relógio comparador para leitura (Figura 3.6).

- Para instalar o mesmo é necessário abrir um furo retangular no concreto de 30 x 30 x 15 mm na parede.
- Posicionar o medidor triortogonal mecânico instalado nos furos e preencher com resina epóxi.
- A leitura inicial (L_i) deve ser obtida 24 horas após a instalação do medidor, nas três direções ortogonais posicionando o relógio comparador em cada uma delas. Leituras subseqüentes serão realizadas conforme a frequência definida.



Figura 3.6 – Medidor triortogonal mecânico com realização das leituras.

Para estimativa da largura de uma abertura pode ser utilizada como auxílio uma escala graduada, chamada de fissurômetro. A Figura 3.7 apresenta a medição de uma abertura em uma estrutura de concreto.



Figura 3.7 – Fissurômetro: Medida da abertura da fenda.

3.3.2 Tipos de aberturas

De acordo com a NBR 8802 (1985), dá-se o nome de abertura ao rompimento do material ocorrido sob ações mecânicas (cargas) ou físico-químicas (temperatura ou retração) podendo, conforme sua magnitude, adquirir outros nomes como rachaduras, fendas, gretas ou brechas.

As aberturas são identificadas de acordo com suas origens e classificadas segundo o momento em que aparecem no concreto, podendo ser no concreto em estado plástico ou endurecido, ou segundo sua atividade na estrutura.

A classificação quanto à abertura está classificada conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Classificação de aberturas. Fonte: Padaratz (2005).

Tipo de abertura	Tamanho
Fissura Capilar	< 0,2 mm
Fissura	0,2 a 0,5 mm
Trinca	0,5 a 1,5 mm
Rachadura	1,5 a 5 mm
Fenda	5 a 10 mm
Brecha	> 10 mm

3.3.3 Causas de aparecimento de aberturas

A seguir estão listadas algumas das causas do aparecimento de aberturas nas estruturas de concreto.

- Ausência ou execução inadequada de juntas de dilatação - aberturas surgem geralmente em consequência da falta de espaços planejados que absorvam a movimentação natural da estrutura. Sua formação alivia esforços e evita colapso total, mas denuncia insuficiência ou má execução das juntas de dilatação;
- Retração por Secagem: provém da contração volumétrica da pasta endurecida, devido à saída de água do concreto conservado em ambiente não saturado.
- Variação Térmica: As aberturas originadas por variação térmica que podem ser consideradas como passivas são as produzidas por ação do fogo, no caso de incêndio, e as produzidas devido ao calor de hidratação do cimento que eleva a temperatura do concreto, produzindo gradientes térmicos entre a camada superficial e as camadas mais internas, e provocando com isso a separação das camadas (Dal Molin, 1988).
- Cargas Dinâmicas: enquadram-se as aberturas de flexão provocadas por ações dinâmicas sobre elementos estruturais.
- Corrosão de Armadura, Reações Expansivas com Sulfatos e Reações Alkali-silicatos: aberturas de origem química ou eletro-química são consideradas ativas progressivas.

- Dessecação Superficial: produz aberturas passivas devido à rápida evaporação da água de amassamento do concreto ou, ainda, pela exagerada absorção dos agregados ou fôrmas.
- Assentamento Plástico: após o lançamento do concreto plástico, as partículas sólidas tendem a continuar se assentando, se neste momento houver uma restrição, seja ela devido à presença de armadura ou aos agregados graúdos, que impeça a livre movimentação da massa para a parte inferior da forma, poderão se produzir aberturas adjacentes ao elemento restringidor. De acordo com Metha e Moteiro (2000), este assentamento ocorre quando a exsudação e o assentamento são excessivos.
- Retração Química: O cimento, em contato com a água, dá lugar a compostos hidratados cujo volume específico, sem considerar os vazios, é menor que a soma dos volumes de água e do cimento antes da hidratação. Esta diminuição de volume, quando restringida, pode ocasionar aberturas no concreto (Borges, 2006).
- Movimentação das Fôrmas: Todo o movimento da fôrma que se produza entre o momento em que o concreto começa a perder fluidez e o momento do início da pega provoca o aparecimento de aberturas (Padaratz, 2005).
- Sobrecargas: pode produzir o fissuramento das estruturas de concreto armado. Algumas delas não indicam a instabilidade da estrutura, podendo ser corrigidas tão logo tenham atingido sua máxima deformação. Outras necessitam que antes se reforce a estrutura para só depois serem corrigidas. (Padaratz, 2005).

3.3.4 Aberturas nas estruturas de concreto de Usinas Hidrelétricas

As manifestações patológicas encontradas durante a vida útil de uma Usina Hidrelétrica estão classificadas em aberturas, infiltrações, desprendimentos e deformações.

As aberturas que ocorrem no concreto, dependendo do local da ocorrência, tipo e largura, devem ser monitoradas após a avaliação pela equipe de inspeção. Muitas aberturas ocorrem em determinado estágio da vida útil da estrutura e tornam-se estáveis no decorrer dos anos, devido a uma redistribuição de tensões. Outras aberturas podem estar em plena atividade, devendo ser acompanhadas para definição de uma medida corretiva.

A seguir serão ilustrados alguns tipos de aberturas encontradas nas estruturas de concreto de Usinas Hidrelétricas.

- UHE Passo Fundo

A Usina Hidrelétrica Passo Fundo, localizada ao norte do Estado do Rio Grande do Sul, é constituída por 2 unidades geradoras, cada uma com capacidade de 113 MW, conforme Figura 3.8. O Projeto, situado na bacia do Rio Uruguai, compreende o desvio das águas do Rio Passo Fundo para o seu afluente Rio Erechim, aproveitando uma diferença de nível de 260 metros. Esta usina entrou em operação em 1973, ou seja, já tem cerca de 30 anos.



Figura 3.8 – Vista geral da UHE Passo Fundo.

As Figuras 3.10 a 3.16 apresentam algumas aberturas existentes nas estruturas de concreto da UHE Passo Fundo. Algumas destas são monitoradas com pinos metálicos (Figura 3.10) e outras com medidor triortogonal mecânico (Figura 3.11). O monitoramento indicou que as mesmas permanecem inativas sofrendo variação apenas conforme a temperatura ambiente.



Figura 3.9 – Fissura encontrada na Casa de Força da UHE Passo Fundo.



Figura 3.10 – Pino metálico para monitoramento da trinca na parede da Casa de Força da UHE Passo Fundo.



Figura 3.11 – Medidor triortogonal mecânico instalado para monitoramento da trinca na parede da Casa de Força da UHE Passo Fundo.



Figura 3.12 – Fissura encontrada na Casa de Força da UHE Passo Fundo.



Figura 3.13 – Fissura à 45° encontrada na Casa de Força da UHE Passo Fundo.

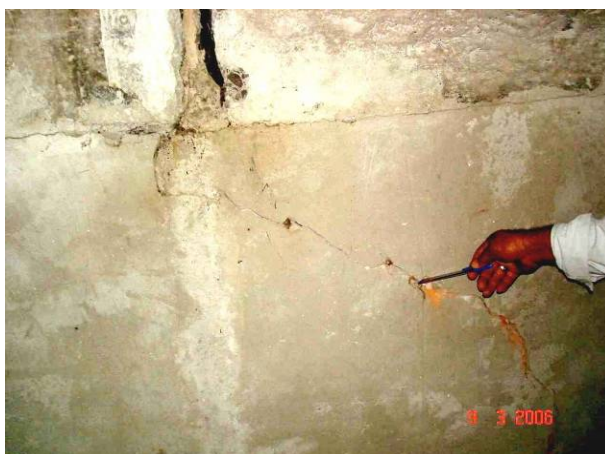


Figura 3.14 – Fissura à 45° encontrada na Casa de Força da UHE Passo Fundo.



Figura 3.15 – Trinca encontrada no piso da Casa de Válvulas da UHE Passo Fundo.

- UHE Machadinho

A Usina Hidrelétrica Machadinho está localizada no Rio Pelotas, aproximadamente 5 km a montante da foz do Rio Apuaê, na divisa entre os Municípios de Piratuba (SC) e Maximiliano de Almeida (RS) conforme Figura 3.16. A UHE Machadinho, dentro do aproveitamento hidroenergético da bacia do Rio Uruguai, localiza-se a montante da Usina Hidrelétrica Itá, em operação desde 2000, e a jusante da Usina Hidrelétrica Barra Grande, cuja operação iniciou-se em 2005.

A Casa de Força tipo abrigada, contém três unidades hidrogeradoras de potência nominal de 380 MW, totalizando 1.140 MW instalados.



Figura 3.16 – Vista geral da UHE Machadinho.

As Figuras 3.18 a 3.22 apresentam algumas aberturas existentes nas estruturas de concreto da UHE Machadinho. Algumas destas aberturas são monitoradas com pinos metálicos, porém permanecem inativas sofrendo variação apenas conforme a temperatura ambiente.



Figura 3.17 – Trinca encontrada na crista do Vertedouro da UHE Machadinho.



Figura 3.18 – Trinca encontrada no teto da galeria de drenagem do Vertedouro da UHE Machadinho.



Figura 3.19 – Fissura na Casa de Força da UHE Machadinho.



Figura 3.20 – Fissura com infiltração encontrada na Casa de Força da UHE Machadinho.

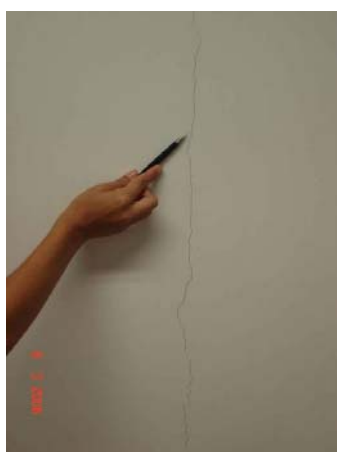


Figura 3.21 – Fissura vertical na parede da Casa de Força da UHE Machadinho.

Caso algumas destas aberturas se mostrassem ativas, poder-se-ia partir para a estimativa de suas profundidades, de forma avaliar o grau de deterioração e/ou comprometimento da estrutura e assim proceder à sua possível vedação. A estimativa da profundidade das aberturas no concreto é de extrema importância quando estas são ativas, para a avaliação do grau de deterioração da estrutura, ou até mesmo para avaliar o risco a que a mesma está exposta.

3.4 UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA ESTIMAR A PROFUNDIDADE DE ABERTURAS

3.4.1 Ultra-Som

Alguns autores como, BS 1881: Part 203, 1986; Bungey, 1989; Pundit Manual, 1994 e Rilem, NDT1, 1972; afirmam que é possível estimar a profundidade de aberturas superficiais através de leituras de tempo de propagação de onda ultra-sônica pelo modo de transmissão indireto. Porém, ainda existe pouca informação disponível sobre a aplicação prática deste procedimento.

Para a detecção da presença de falhas no concreto, utilizando o modo de propagação indireto plota-se um gráfico relacionando o tempo de propagação da onda com a distância entre os transdutores, conforme gráfico da Figura 3.22. Se os pontos (L_1T_1 a L_5T_5) estão praticamente alinhados à reta não existe falha, porém, se um dos pontos subsequentes estiver muito afastado (L_6T_6) do alinhamento dos pontos anteriores, significa que existe uma falha entre este ponto (L_6T_6) e o anterior (L_5T_5), neste caso uma abertura.

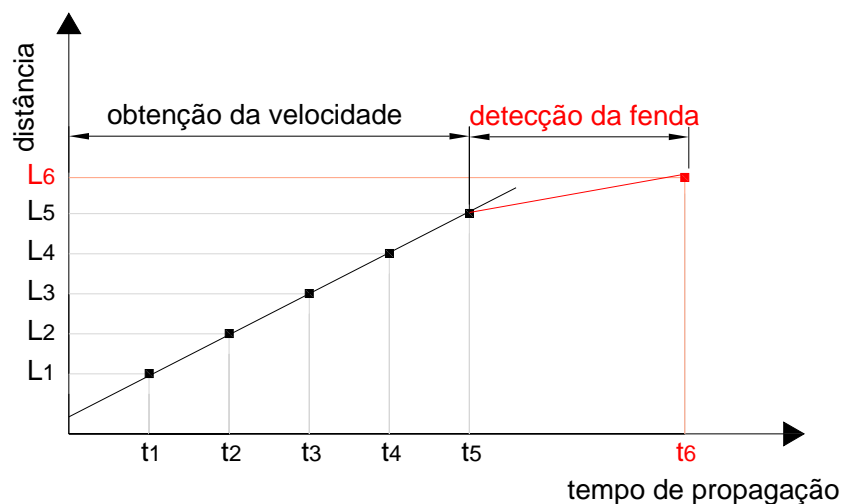


Figura 3.22 – Curva tempo de propagação da onda (t) versus distância (d) para obtenção da velocidade e detecção da fenda.

3.4.1.1 Aberturas inclinadas

Pode-se verificar se a abertura é ou não perpendicular à superfície posicionando os transdutores próximos a mesma, mantendo o transmissor fixo e movendo o receptor para mais longe da abertura, como mostra a Figura 3.23. Se o tempo de propagação da segunda leitura (transdutores mais afastados) for menor que o tempo da primeira leitura é um indicativo de que a abertura é

inclinada no sentido do transmissor para o receptor (Medeiros, 2007). Porém pode também ser indicativo de que a abertura é muito profunda. Para certificar, basta inverter os transdutores. Se o tempo obtido para a leitura com os transdutores mais próximos for menor do que com eles afastados, a abertura é mesmo inclinada no sentido da leitura anterior. Caso contrário, a abertura pode ser perpendicular à superfície, porém muito profunda. (BS 1881: Part 203, 1986).

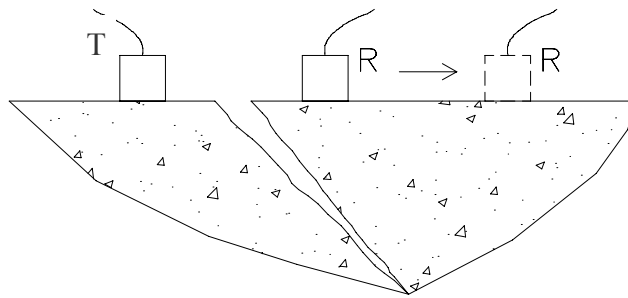


Figura 3.23 – Leitura de ultra-som ao redor de uma abertura inclinada. (Fonte: BS 1881: Part 203, 1986 *apud* Medeiros, 2007).

Sakata e Ohtsu (1995) *apud* Medeiros (2007), estudaram, através do espectro de frequências ultra-sônicas a estimativa de aberturas superficiais induzidas, com 0 a 90 mm e relatam que a técnica é capaz de estimar a profundidade destas aberturas com precisão.

Popovics *et al* (2000), utilizando transmissão de ondas de superfície, conseguiram detectar e estimar com precisão profundidades de aberturas até 100 mm, induzidas por flexão em concretos de diferentes composições.

Estudos realizados por Hauwaert, Delannay e Thimus (1999), Stauffer, Woodward e White (2005) e Suaris e Fernando (1987) mostram que o ultra-som, auxiliado por outros equipamentos que possibilitem a análise do espectro de frequências, também é capaz de indicar o momento em que se inicia a microfissuração interna do concreto sob carga, antes que apareça indicativo visual externo.

3.4.1.2 Obtenção da velocidade de propagação de onda ultra-sônica pelo método indireto

Na obtenção da velocidade de propagação de onda ultra-sônica pelo modo de transmissão indireto realizam-se leituras de acordo com o procedimento recomendado pela NBR 8802 (1994), onde o transdutor-transmissor mantém-se fixo e movimenta-se o transdutor-receptor com incremento de 10 cm a cada leitura. Conforme a Figura 3.24, escolhe-se o lado da peça com

maior comprimento disponível, realizando um total de quatro leituras. A velocidade indireta é obtida do gráfico Tempo de Propagação *versus* Distância (Figura 3.22), pelo coeficiente angular da reta que melhor se ajusta aos pontos (L_1T_1, \dots, L_nT_n).

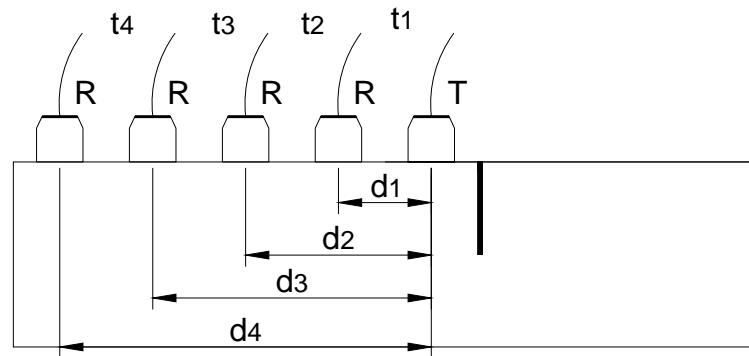


Figura 3.24 – Procedimento indireto para obtenção da velocidade de propagação da onda.

3.4.1.3 Estimativa da profundidade das aberturas

A seguir apresentam-se os modelos propostos na literatura para estimativa da profundidade das aberturas a partir do ensaio de ultra-som.

a) Modelo proposto por Bungey (1989):

Neste modelo, denominado modelo 1, a profundidade de uma abertura perpendicular à superfície de concreto pode ser estimada utilizando leituras de ultra-som no modo de transmissão indireto, como mostra a Figura 3.25 (Bungey, 1989). No caso, estando os transdutores equidistantes da abertura superficial e adotando uma velocidade para o concreto íntegro “ V_c ”, tem-se:

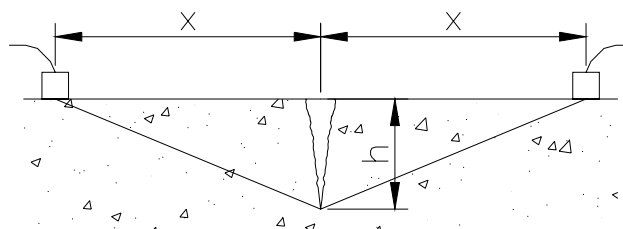


Figura 3.25 – Medida da profundidade de uma fenda. (Fonte: Bungey, 1989).

Percurso sem a abertura (L_c):

$$L_c = 2X \quad (3.1)$$

Percurso desviando da abertura “ L_f ”:

$$L_f = 2\sqrt{X^2 + h^2} \quad (3.2)$$

Tempo de propagação sem a abertura “ T_c ”:

$$T_c = \frac{2X}{V_c} \quad (3.3)$$

Tempo de propagação desviando da abertura “ T_f ”:

$$T_f = \frac{2\sqrt{X^2 + h^2}}{V_c} \quad (3.4)$$

Tomando a mesma velocidade “ V_c ” para os casos com e sem a abertura, e igualando-se as Equações 3.3 e 3.4 de forma a eliminar “ V_c ” chega-se a:

$$h = \left(\frac{X}{T_c} \right) \sqrt{T_f^2 - T_c^2} \quad (3.5)$$

onde:

h = profundidade da abertura;

X = distância do transdutor à abertura;

T_f = tempo de propagação ao redor da abertura;

T_c = tempo de propagação, para uma mesma distância entre transdutores, em regiões onde não há abertura.

Conforme Medeiros (2007) esta estimativa somente é válida admitindo que a velocidade seja a mesma nas leituras pelo modo de transmissão indireto em volta de uma abertura e em uma região

de concreto íntegro. Esta suposição pode levar a erros, pois o pulso que contorna a abertura se desloca por uma região do concreto diferente da região do pulso que se desloca próximo a superfície do concreto íntegro, e existe dúvida quanto a real extensão do percurso do pulso. Através da Figura 3.25 o pulso caminha linearmente do transdutor-emissor até a parte mais profunda da abertura e em seguida refrata até o transmissor-receptor. Entretanto o real percurso percorrido pelo pulso não é linear e existe perda de energia nas difrações ao longo do percurso.

Medeiros (2007) utilizou este modelo proposto por Bungey na sua dissertação: “Utilização do ultra-som na estimativa da profundidade de aberturas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado”, e concluiu que é possível estimar a profundidade de aberturas superficiais perpendiculares à superfície com uma precisão de até 20 %. Os resultados obtidos estabeleceram uma relação máxima e mínima da profundidade da abertura (h) com a distância do eixo dos transdutores (X) à abertura para a sua detecção. Estas relações ficaram entre $X/h > 1,0$ até $X/h < 4,0$.

b) Modelo proposto pela BS 1881: Part 203 (1986):

O modelo presente na BS 1881: Part 203 (1986), aqui denominado de modelo 2, descreve um procedimento semelhante ao anterior, porém com um arranjo combinado dos transdutores simétricos à abertura de tal forma que não se necessite estimar uma velocidade pelo modo de transmissão indireto. O procedimento consiste em posicionar o emissor e receptor simétricos à abertura superficial a uma distância “X”, como na Figura 3.26, e anotar o tempo de propagação “ T_1 ”, em seguida posicionar os transdutores equidistantes da fenda de “ $2X$ ” e anotar o tempo de propagação “ T_2 ”. Admitindo que o pulso percorra pelo concreto o menor caminho entre os dois transdutores passando pelo fundo da abertura com a mesma velocidade “V” tem-se uma modificação da Equação 3.4 para a Equação 3.6 onde o “ T_1 ” é dado por:

$$T_1 = \frac{2\sqrt{X^2 + h^2}}{V} \quad (3.6)$$

O tempo de transmissão “ T_2 ” obtido com o dobro da distância entre transdutores pode ser expresso como uma modificação da Equação 3.4 para a Equação 3.7:

$$T_2 = \frac{2\sqrt{4X^2 + h^2}}{V} \quad (3.7)$$

Tomando a mesma velocidade “V”, e igualando as Equações 3.6 e 3.7 de forma a eliminar “V” tem-se:

$$h = X \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (3.8)$$

A BS 1881: Part 203 (1986) comenta que um bom arranjo para os transdutores pode ser feito adotando 15,0 cm para a distância “X”.

Pode se fazer uma generalização da Equação 3.8, tomando distâncias múltiplas de “X” para os tempos “T₁” e “T₂”, como sendo “a” e “b” respectivamente, com “a < b”, assim tem-se:

$$h = X \sqrt{\frac{b^2 T_1^2 - a^2 T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (3.9)$$

Bungey (1989) afirma que as aberturas superficiais podem ser estimadas com estes dois modelos 1 e 2 com uma precisão de ± 15% devido aos erros inerentes às leituras pelo modo de transmissão indireto.

c) Modelo proposto por Pinto, Medeiros e Padaratz (2007):

Conforme apresentado no item a, quando da utilização do modo de transmissão indireta, não se conhece com precisão o caminho de propagação da onda visto que os transdutores não são pontuais. Desta forma, para se obter a velocidade de propagação no modo indireto utiliza-se de um método gráfico a partir de várias leituras conforme apresentado na Figura 2.4.

Os métodos anteriormente descritos não utilizaram tal procedimento para obtenção da velocidade e como consequência insere imprecisão na estimativa da profundidade (h).

Pinto, Medeiros e Padaratz (2007) reconhecendo este fato propuseram uma metodologia de obtenção de “h” com o ultra-som a partir de leituras indiretas fornecendo também uma estimativa de velocidade utilizando-se, tal qual para obtenção de V indireto, de um método gráfico a partir de várias leituras.

Dois modelos, eqüidistante e linear foram desenvolvidos para serem utilizados, dependendo das condições de ensaio.

- **Modelo Eqüidistante**

Neste modelo, posicionam-se os transdutores eqüidistantes À abertura superficial, conforme a Figura 3.26, com pelo menos 3 leituras indiretas. Para cada distância X_i , obtém-se o tempo de propagação T_i .

Sabendo-se que o tempo de propagação da onda (T) é igual à distância percorrida (L) pela velocidade da onda (V) tem-se que:

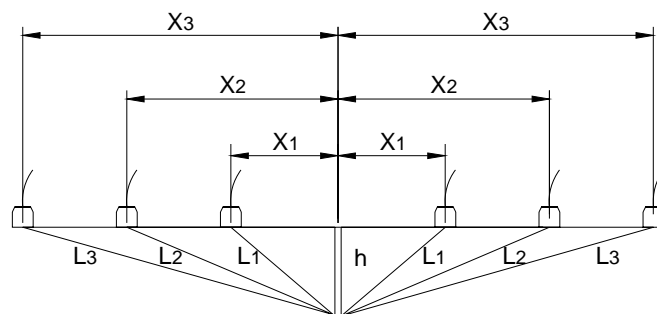


Figura 3.26 – Medida da profundidade de uma abertura, modelo eqüidistante. (Fonte: Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007).

$$T_i = \frac{2L_i}{V} \quad (3.10)$$

$$L_i^2 = X_i^2 + h^2 \quad (3.11)$$

onde:

T_i = tempo de propagação da onda;

L_i = distância percorrida pela onda;

h = profundidade da abertura;

V = velocidade da onda de propagação.

Substituindo a Equação 3.11 na Equação 3.10, tem-se:

$$T_i = \frac{2\sqrt{X_i^2 + h^2}}{V} \quad (3.12)$$

Isolando-se X_i :

$$X_i^2 = \frac{T_i^2 V^2}{4} - h^2 \quad (3.13)$$

Esta expressão pode ser representada graficamente relacionando X_i^2 com $T_i^2/4$, onde a inclinação da reta é dada pelo quadrado da velocidade (V) e a intersecção pelo quadrado da profundidade (h), conforme apresentado na Figura 3.27.

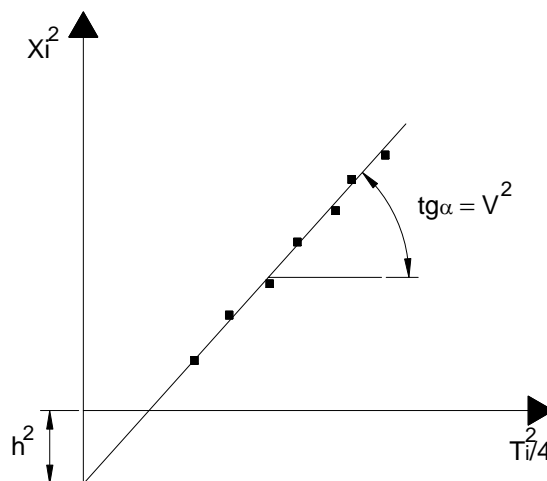


Figura 3.27 – Curva obtida com tempos de propagação (T_i) x distância (S_i) (Fonte: Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007).

- **Modelo Linear**

Uma variação deste modelo equidistante, chamado de modelo linear, pode ser utilizada quando a abertura ocorre próxima a uma face da peça e não há condições de se fazer leituras equidistantes. Neste caso fixa-se o transdutor-emissor em um lado da abertura, movendo-se o transdutor-receptor do outro lado, conforme apresentado na Figura 3.28.

Sabendo-se que o tempo de propagação da onda (T) é igual à distância percorrida (L) pela velocidade da onda (V) tem-se:

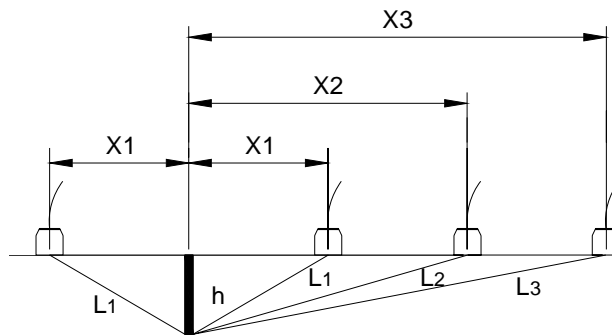


Figura 3.28 – Medida da profundidade de uma abertura, modelo linear. (Fonte: Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007).

$$T_1 = \frac{2L_1}{V} \quad \text{ou} \quad VT_1 = 2L_1 \quad (3.14)$$

$$T_2 = \frac{L_1 + L_2}{V}$$

$$T_i = \frac{L_1 + L_i}{V} \quad \text{ou} \quad VT_i = L_1 + L_i \quad (3.15)$$

$$L_i = \sqrt{h^2 + X_i^2} \quad (3.16)$$

Subtraindo-se a Eq. 3.15 da Eq. 3.14, tem-se:

$$VT_i - VT_1 = L_1 + L_i - 2L_1 = L_i - L_1$$

$$VT_i - VT_1 = L_i - L_1$$

$$VT_i - VT_1 = L_i - \frac{VT_1}{2}$$

$$V\left(T_i - \frac{T_1}{2}\right) = L_i$$

Substituindo L_i pela Eq. 3.16 tem-se:

$$V\left(T_i - \frac{T_1}{2}\right) = \sqrt{h^2 + X_i^2} \quad \text{ou} \quad X_i^2 = V^2\left(T_i - \frac{T_1}{2}\right)^2 - h^2, \text{ o que pode ser representado graficamente}$$

pela Figura 3.29.

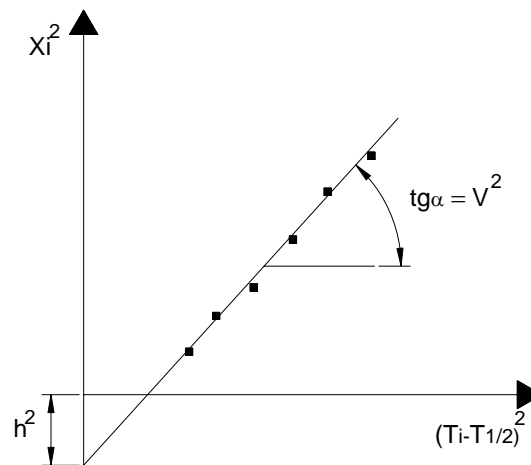


Figura 3.29 – Curva obtida com tempos de propagação (T) x distância (X) (Fonte: Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007).

3.4.2 Eco-Impacto

Quando ondas de tensão são geradas por um impacto na superfície do concreto próximo a uma abertura de superfície, como mostrado na Figura 3.30(a), o padrão da propagação de onda difere significativamente do padrão em um concreto sólido.

A onda P primeiro se reflete na abertura, gerando uma onda P_c , vide Figura 3.30(b). Quando a onda P atinge o fim da abertura, ela se reflete, gerando uma onda denominada P_dP . Se o transdutor-receptor é posicionado do outro lado da abertura, as ondas R e S não atingem o transdutor diretamente e assim a primeira onda que chega ao transdutor é a onda refletida P_dP , conforme demonstrado na Figura 3.30(c) e Figura 3.30(d).

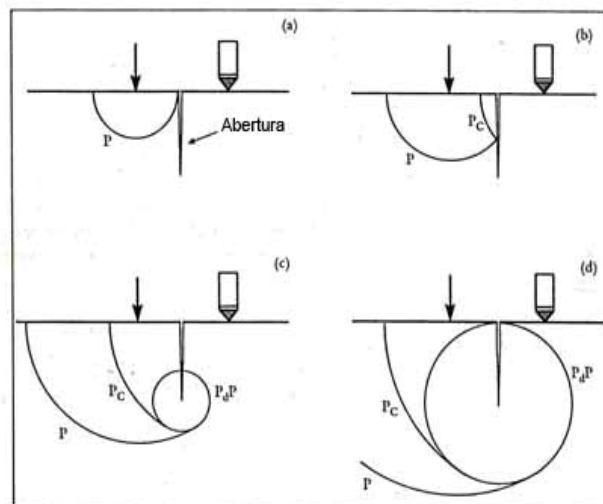


Figura 3.30 – Reflexão e difração de ondas P de uma abertura de superfície: (a) onda P inicial gerada por impacto, (b) P_c é a P-onda refletida da abertura, (c) e (d) P_dP é a difração da onda P do fundo da fenda. (Fonte: Sansalone, 1998)

O ponto de impacto e o transdutor são posicionados em linha aproximadamente perpendicular à linha da abertura. Se as distâncias da abertura até o ponto de impacto e da fenda para o transdutor são conhecidas, o tempo entre o impacto e a chegada da onda de P_dP ao transdutor pode ser medido e a profundidade da abertura pode ser calculada. Este método é ilustrado esquematicamente na Figura 3.31 (Sansalone, Lin, e Streett, 1998). Segundo Sansalone (1998), esta técnica pode ser usada para obter boas aproximações das profundidades, medida perpendicular à superfície, de aberturas perpendiculares, inclinadas e encurvadas à superfície.

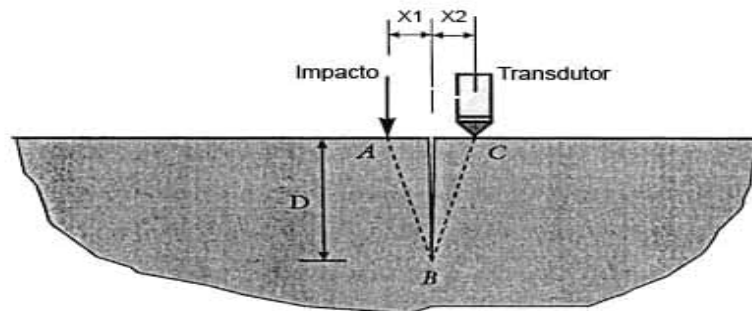


Figura 3.31 - Diagrama esquemático que mostra um método de *time-of-flight* para medir profundidade da abertura.
(Fonte: Sansalone, 1998)

Para o caso de uma abertura perpendicular à superfície de concreto, o intervalo de tempo, Δt , entre o começo do impacto e a chegada da onda PdP ao transdutor é o tempo requerido para uma onda P viajar a distância $AB + BC$, conforme mostra a Figura 3.31. Esta distância é a velocidade de onda V_p , multiplicada por Δt . Se X_1 , X_2 e Δt são conhecidos, a profundidade h da fenda poderá ser calculada pelas seguintes equações:

$$(AB)^2 = X_1^2 + h^2 \quad (3.17)$$

$$(BC)^2 = X_2^2 + h^2 \quad (3.18)$$

$$AB + BC = V_p \Delta t \quad (3.19)$$

onde são desconhecidos AB , BC , e h . Se $X_1 = X_2 = X$, então $AB = BC$, e as equações são simplificadas. Isolando-se h chega-se a:

$$h = \sqrt{\frac{(V_p \Delta t)^2}{4} - X^2} \quad (3.20)$$

Para utilização da expressão 3.20, necessita-se do conhecimento prévio da velocidade V_p e do tempo decorrido desde o impacto até a chegada da onda no receptor.

A velocidade da onda P pode ser obtida realizando-se um outro ensaio de eco-impacto através de dois métodos diferentes: (1) utilizando-se de 2 transdutores em uma região próxima a abertura e medindo-se o tempo em que a onda de tensão percorre a distância conhecida entre os transdutores; e (2) avaliando-se a frequência dominante do teste, conhecida a espessura da placa.

Ambos estes métodos estão baseados no procedimento ASTM C1383-98, como apresentado no item 2.4.6.

O 1º método com a utilização de 2 transdutores mede a chegada de uma onda de tensão (onda P ou onda R-) a dois transdutores a uma distância fixa separadamente em uma superfície sólida. Se a distância fixa for L e a diferença de tempo entre chegadas medidas Δt^* , a velocidade é a distância dividida por tempo.

$$V_p = \frac{L}{\Delta t^*} \quad (3.21)$$

A Figura 3.32 apresenta o esquema do teste a partir de 2 transdutores, e a Figura 3.33 é o desenvolvimento de uma medida de velocidade da onda.

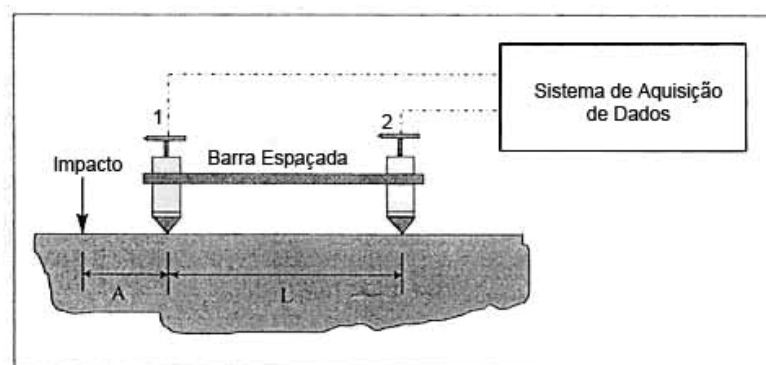


Figura 3.32 – Esquema da representação do teste para medida da velocidade (Fonte: Sansalone, 1997).



Figura 3.33 – Execução do ensaio para obtenção da velocidade da onda.

A velocidade da onda medida está contida em um único gráfico no quais duas formas de ondas são plotadas quando o teste é executado, conforme apresentado na Figura 3.34 (a) para o método 1, obtendo a velocidade pela Eq. 3.21. Já para o método 2 a velocidade da onda é calculada através do gráfico de freqüência x amplitude, conforme mostrado na Figura 3.34 (b), onde a velocidade é obtida conforme descrito no item 2.4.4.

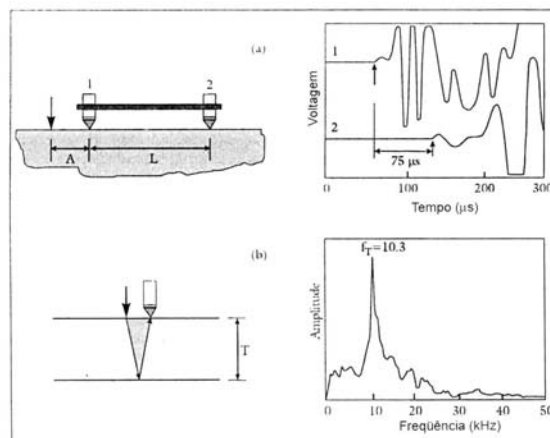


Figura 3.34 – Esquema do teste para medida da velocidade pelo método 1 e 2 (Fonte: Sansalone, 1997).

Porém o tempo preciso do início do impacto é difícil medir diretamente, assim utiliza-se um segundo transdutor para obter (Δt) . Este transdutor é posicionado no mesmo lado da abertura com o impacto e monitorado pelo mesmo dispositivo cronometrado com o outro transdutor. O

arranjo experimental é mostrado em Figura 3.35 (a), e um registro dos sinais obtidos pelos dois transdutores é mostrado na Figura 3.35 (b).

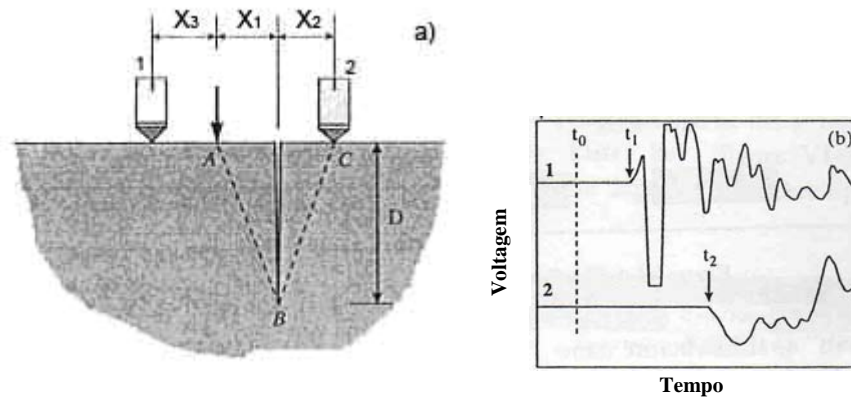


Figura 3.35 - Medindo a profundidade de uma abertura de superfície: (a) esquema de ligação de teste experimental, e (b) formas de onda da amostra (Fonte: Sansalone, 1998).

Chama-se de t_0 o começo do impacto, que não é conhecido e t_1 como o tempo de chegada da P-onda direto ao transdutor 1 (mais perto), e t_2 como o tempo de chegada da onda P de reflexão (PdP) ao transdutor 2 (outro lado da abertura). Necessita-se da diferença de tempo $\Delta t = t_2 - t_0$. Embora t_0 não possa ser medido diretamente, a diferença $t_1 - t_0$ pode ser calculada através da distância X_3 e da velocidade V_p da onda P sendo determinada usando a Eq. 3.22.

$$t_1 - t_0 = \frac{X_3}{V_p} \quad (3.22)$$

O tempo de chegada da onda P direta ao transdutor 1 (t_1), é o ponto no gráfico superior na Figura 3.35 (b) a qual a tensão começa a subir devido à chegada da onda P. O tempo t_2 é o tempo de chegada da onda de reflexão, PdP, ao transdutor 2. Como PdP é uma onda de tração, sua chegada causa um deslocamento descendente, assim t_2 é o ponto no gráfico ao qual a tensão começa a baixar.

Resolvendo a expressão 3.22, substituindo-a na equação $\Delta t = t_2 - t_0$:

$$\Delta t = (t_2 - t_1) + \frac{X_3}{V_p} \quad (3.23)$$

Assim, obtêm-se a diferença de tempo Δt pelos tempos de chegada da onda nos transdutores e pela velocidade V_p .

Sansalone e Streett (1997) sugerem que a distância X_2 do transdutor 2 para a abertura deva ser de aproximadamente 0.03 a 0.05 m, e a distância X_3 entre o ponto de impacto e transdutor 1 deva estar entre 0.05 m e 0.15 m. Segundo estes autores, uma distância maior que 0.05 m assegura que haverá tempo suficiente para que a onda P se separe das ondas S e R. Sansalone e Streett (1997), também sugerem que os impactos tenham durações de 20 a 60 μs (obtidos com impactadores com dimensões entre 5 e 12 mm).

Sansalone e Streett (1997) realizaram pesquisas buscando calcular a profundidade de aberturas inclinadas ou de trajetórias encurvadas. Tais aberturas são caracterizadas pelo ângulo de inclinação, medido como desvio da perpendicular. A profundidade da abertura só pode ser medida como a distância perpendicular da superfície até a ponta da mesma.

Foram obtidos bons resultados na estimativa da profundidade da abertura como a distância perpendicular. Também foram realizados testes invertendo as posições do impactador e receptor com relação à abertura, concluindo-se que para qualquer uma das duas possíveis orientações para o impactador e o receptor relativo à orientação da fenda inclinada ocorre uma boa aproximação da profundidade da abertura real.

Concluiu-se nestes estudos que, ao executar testes para determinar a profundidade de aberturas inclinadas ou encurvadas, podem ser requeridos vários testes para algumas geometrias. Uma sucessão de testes deveria ser executada, com impactador/abertura variados e o receptor/abertura distanciados.

CAPÍTULO 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental teve como objetivo a estimativa da profundidade de aberturas, utilizando a infra-estrutura disponível nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Todas as etapas do programa foram desenvolvidas no Grupo de Pesquisas em Ensaios não Destrutivos (GPEND), com auxílio de equipamentos do Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) e do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).

Foram produzidas sete amostras de 20 x 20 x 80 cm, com aberturas induzidas na superfície, variando as suas profundidades. A partir deste capítulo estas aberturas serão denominadas de “fendas” conforme a classificação da Tabela 3.3. Os ensaios não destrutivos de ultra-som e de eco-impacto foram utilizados para a estimativa da profundidade das fendas, e comparação com os valores reais.

O concreto produzido para as amostras foi confeccionado nos laboratórios citados acima com a utilização de materiais de uma loja de materiais de construção de Florianópolis.

Neste estudo foram adotados dois traços de concreto para o programa experimental, confeccionados com os mesmos agregados e o mesmo tipo de cimento.

Foi adotado o mesmo procedimento de Medeiros (2007) para a indução das fendas. Logo depois de concretadas as amostras, foram introduzidas chapas de aço, que foram retiradas após 6 horas. Estas fendas foram induzidas na face superior das amostras. Após a desforma estas amostras foram rotacionadas obtendo uma face de leitura com uma superfície plana e alisada. Na Figura 4.1 está apresentada a seqüência de atividades associadas com a indução das fendas inclinadas e perpendiculares. E a Figura 4.2 apresenta uma vista das amostras rotacionadas.

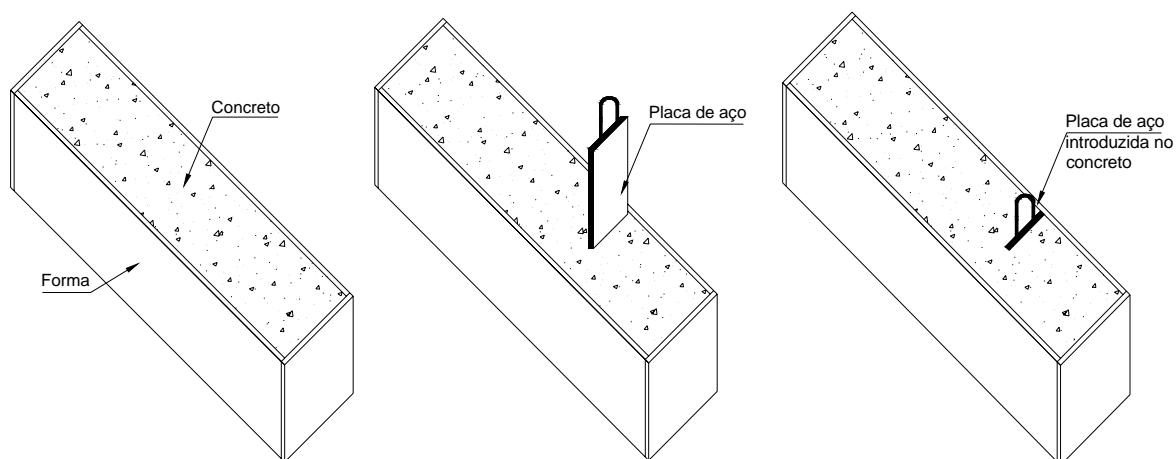


Figura 4.1 - Seqüência para indução das fendas.

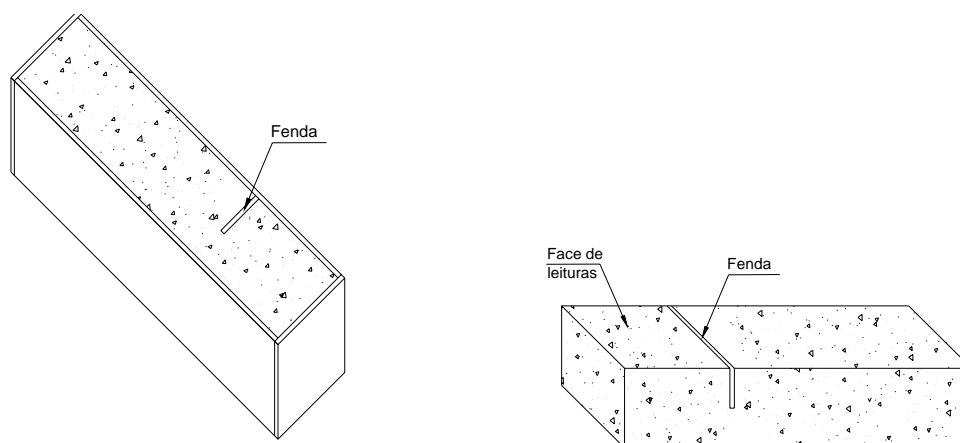


Figura 4.2 – Fenda concluída e amostra rotacionada para realização das leituras.

Fendas perpendiculares e inclinadas a 30° e 45° , em relação à superfície ensaiada, foram produzidas. A Tabela 4.1 apresenta uma descrição de cada amostra produzida de acordo com a Figura 4.3.

Tabela 4.1 – Descrição das amostras.

Amostra	Profundidade -h (cm)	Inclinação - θ	Largura -w (mm)
1	2,5	perpendicular	2
2	5	perpendicular	2
3	7,5	perpendicular	5
4	10	perpendicular	5
5	7,5	30°	5
6	7,5	45°	5
7	10	45°	5

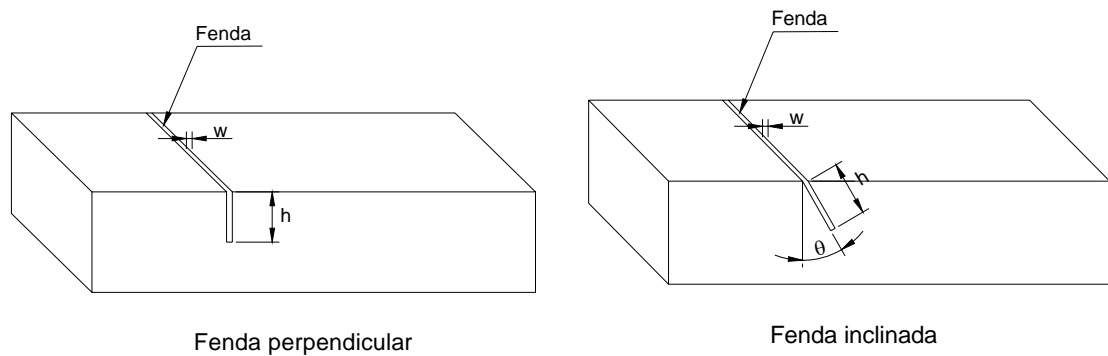


Figura 4.3 – Tipo de fendas induzidas.

4.2 VARIÁVEIS INTERVENIENTES

O programa experimental apresentado neste capítulo procurou eliminar algumas variáveis que exercem influência sobre os resultados dos ensaios de determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica no concreto, especialmente pelo modo de transmissão indireto, de forma que a única variável fosse a presença da fenda.

Tendo em vista que a dimensão máxima dos agregados e diferentes tipos de agregados podem alterar os valores de velocidade, conforme descrito no item 2.3.3.2, neste programa experimental foram utilizados os mesmos agregados, com a mesma composição granulométrica, para todas as amostras de concreto. Além disto, manteve-se o mesmo tipo de cimento para todas as amostras.

Todo o concreto foi produzido em laboratório em temperatura ambiente de 22° C.

As amostras foram confeccionadas em formas de compensado plastificado, de tal forma a ter as faces laterais e inferiores planas e alisadas. Como desmoldante foi utilizada uma emulsão a base de ácidos graxos.

As leituras de ultra-som foram realizadas utilizando o equipamento PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester*) fabricado pela empresa inglesa CNS Farnell, com transdutores de 50 mm de diâmetro e frequência natural de vibração de 54 kHz. Esta frequência era suficiente para garantir, para a faixa de velocidades obtidas neste trabalho de 3500 a 4500 m/s, um comprimento de onda entre 65 e 83 mm, respectivamente.

As leituras de ultra-som foram realizadas nas faces laterais das amostras, face na qual foram induzidas as fendas, a fim de ter para as leituras de ultra-som uma superfície mais plana e mais alisada que a face de concretagem.

As leituras com o eco-impacto foram realizadas utilizando o equipamento *IMPACT-ECHO Instruments* fabricado pela empresa americana LLC de Ithaca, New York.

Nestas leituras foram utilizados os transdutores de duas cabeças acoplados à uma esfera de aço, para obtenção da velocidade da onda, e os transdutores isolados, juntamente com esferas de aço de 5 a 12 mm, para estimativa da profundidade das fendas. Estas leituras também foram realizadas nas faces laterais das amostras, face na qual foram induzidas as fendas. Foi utilizada pedra de carborundum, no formato cilíndrico, para melhor polimento da superfície na acoplagem dos transdutores.

Os ensaios de ultra-som e de eco-impacto foram realizados a partir dos 28 dias, para todas as amostras.

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de 20 x 20 x 80 cm foram produzidas utilizando cimento CII Z-32, agregado graúdo, agregado miúdo, aditivo plastificante e água.

O agregado graúdo utilizado foi a brita 1, com diâmetro máximo 19 mm, de origem granítica e proveniente de Florianópolis, SC. Como agregado miúdo, utilizou-se areia fina natural, proveniente da cidade de Florianópolis, SC, com um módulo de finura de 3,10. Um aditivo redutor de água WRDATM 38, da GRACE Construction Products, foi incorporado no traço 1 para melhorar a trabalhabilidade do concreto. A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Florianópolis.

No Anexo B estão apresentados às tabelas referentes à análise física e química do cimento e a caracterização dos agregados graúdos e miúdos.

As amostras de concreto foram confeccionadas com resistência característica de 18 MPa. As Tabela 4.2 apresenta a composição de cada traço utilizado.

Tabela 4.2 - Composição por metro cúbico de concreto.

Materiais	Unidade	Traço 1	Traço 2
Cimento	Kg	265	289
Areia fina	Kg	795	766
Brita 1	Kg	1102	1055
Água	kg	180	202
Aditivo	litro	1,76	-

Todos os materiais foram dosados em massa, inclusive a água. A seqüência de colocação dos materiais foi a seguinte, primeiro a totalidade do agregado graúdo, depois 80% a 90% da água, cimento, agregado miúdo, restante da água, e, por fim, o aditivo.

A primeira dosagem teve um abatimento de 8,5 cm e a segunda um abatimento de 10 cm.

O adensamento dos moldes e corpos-de-prova cilíndricos foi feito mecanicamente, com vibrador de agulha, seguindo as prescrições da NBR 5738 (1994).

As figuras a seguir apresentam a seqüência de concretagem e a indução das fendas com placa de aço.



Figura 4.4 – Forma das setes amostras de 20 x 20 x 80 cm.



Figura 4.5 – Início da concretagem com vibrador.



Figura 4.6 – Término da concretagem.



Figura 4.7 – Indução das fissuras com placas de aço.

Durante as primeiras 96 horas, os moldes foram mantidos nas fôrmas, cobertos com lona plástica, a fim de evitar perda de água. Após as 96 horas iniciais, os moldes foram desformados e armazenados ao ar, à sombra, na temperatura ambiente do laboratório.

Devido ao fato do concreto ter sido produzido com traços diferentes, a Tabela 4.3 apresenta a descrição de cada amostra conforme o traço utilizado. Na amostra 4 foi utilizado os dois traços.

Tabela 4.3 – Resumo das amostras.

Amostra	Profundidade -h (cm)	Inclinação - θ	Largura -w (mm)	Traço
1	2,5	perpendicular	2	1
2	5	perpendicular	2	1
3	7,5	perpendicular	5	1
4	10	perpendicular	5	1+2
5	7,5	30°	5	2
6	7,5	45°	5	2
7	10	45°	5	2

Para cada dosagem de concreto foram moldados dois corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm, os quais foram mantidos em temperatura ambiente no laboratório nas mesmas condições das amostras e rompidos conforme NBR 5739 (1994) aos 28 dias. Os resultados do rompimento dos corpos-de-prova estão apresentados na Tabela 4.4.

Como esperado o traço 2 obteve uma resistência menor, pois possuía uma relação água/cimento maior. Para efeito desta pesquisa a resistência não é um fator significante na estimativa das profundidades das fendas

Tabela 4.4 – Resistência à compressão de cada corpo-de-prova (MPa).

Nº Corpo-de-prova	Traço 1	Traço 2
1	19,20	15,10
2	19,63	15,53
Média MPa	19,42	15,32

4.4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

4.4.1 Leituras com Ultra-som

Para obtenção das leituras foi utilizado o equipamento PUNDIT, no modo de transmissão indireto. A calibração do PUNDIT foi feita cada vez que o equipamento foi ligado, utilizando-se uma barra de referência seguindo recomendação do fabricante. Foi utilizada vaselina como acoplante, tanto na calibração como nos ensaios nas amostras de concreto.

A Figura 4.8 apresenta o aparelho PUNDIT utilizado para as leituras e a Figura 4.9 apresenta a calibração do mesmo.



Figura 4.8 - Aparelho PUNDIT utilizado nos ensaios.



Figura 4.9 – Calibração do aparelho PUNDIT utilizado nos ensaios.

As leituras com o ultra-som foram realizadas em uma linha de referência distante 8 cm da borda da amostra e foram realizadas pelo menos duas seqüências de leituras por ponto, sendo registrado para cada leitura o valor médio apresentado no mostrador digital do equipamento (Figura 4.10).

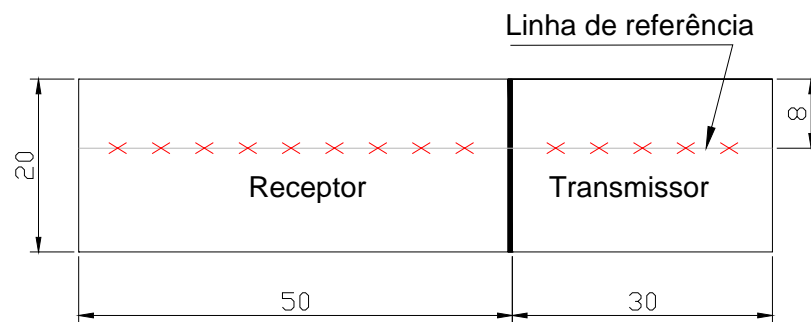


Figura 4.10 – Esquema para leituras com ultra-som.

4.4.1.1 Estimativa da profundidade das fendas

Optou-se pela realização de cinco procedimentos de leituras, para estimativa de profundidade das fendas. Estes procedimentos possibilitaram a aplicação dos modelos apresentados no item 3.4.1 variando as distâncias entre os transdutores.

- Procedimento A

Neste 1º procedimento manteve-se fixo o transdutor-transmissor a 5 cm antes da fenda, variando-se a posição do transdutor-receptor de 5 em 5 cm após a fenda. Estas leituras foram realizadas com o concreto com idade de 28 dias. Um total de 9 leituras foi realizada em cada amostra, conforme apresentado na Figura 4.11.

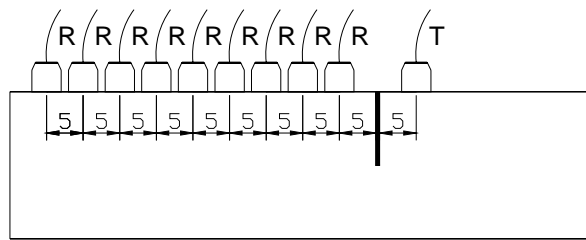


Figura 4.11 – Procedimento A – Transmissor fixo antes da fenda a 5 cm e receptor variando depois da fenda de 5 em 5 cm.

A Figura 4.12 apresenta uma foto do ensaio utilizando este procedimento.



Figura 4.12 – Realização da leitura com o ultra-som – Procedimento A.

- Procedimento B

Neste 2º procedimento, similar ao anterior, manteve-se fixo o transdutor-transmissor a 10 cm antes da fenda, variando-se a posição do transdutor-receptor de 10 em 10 cm após a fenda. Estas leituras foram realizadas com o concreto com idade de 28 dias. Um total de 4 leituras foi realizadas em cada amostra, conforme apresentado na Figura 4.13.

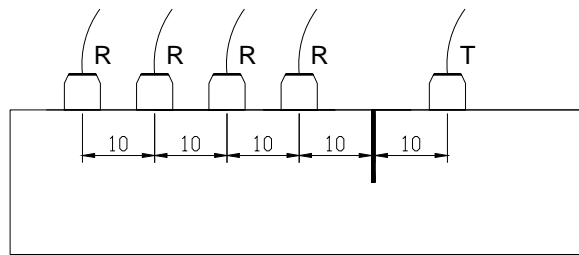


Figura 4.13 – Procedimento B – Transmissor fixo antes da fenda a 10 cm e receptor variando depois da fenda de 10 em 10 cm.

A Figura 4.14 apresenta uma foto do ensaio utilizando este procedimento.



Figura 4.14 – Realização da leitura com o ultra-som – Procedimento B.

- Procedimento C

Este 3º procedimento foi adicionado logo após a realização dos ensaios do procedimento B, onde buscou-se um maior número de leituras, com isto estas leituras foram realizadas com o concreto na idade de 60 dias. Este considera a posição do transmissor fixo a 10 cm antes da fenda, variando-se o receptor continuamente de 5 em 5 cm após a fenda. . Um total de 8 leituras foram realizadas em cada amostra, conforme apresentado na Figura 4.15.

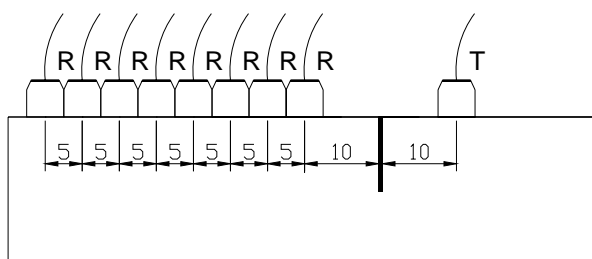


Figura 4.15 – Procedimento C – Transmissor fixo antes da fenda a 10 cm e receptor variando depois da fenda de 5 em 5 cm.

- Procedimento D

Neste 4º procedimento variou-se continuamente os 2 transdutores em distâncias equidistantes de 5 em 5 cm da fenda. Estas leituras foram realizadas com o concreto a 28 dias de cura. Um total de 5 leituras foram realizadas em cada amostra, conforme apresentado na Figura 4.16.

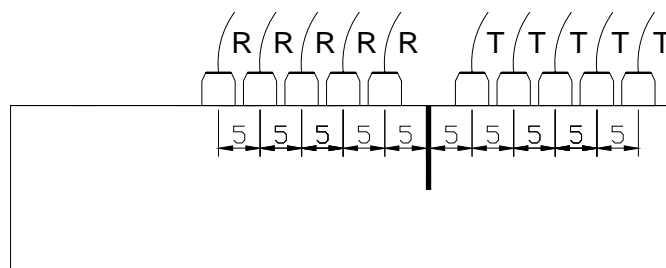


Figura 4.16 – Procedimento D – Variando transmissor e receptor com a mesma distância de 5 em 5 cm.

- Procedimento E

Este último procedimento foi criado para buscar a identificação da fenda de profundidade de 2,5 cm devido ao fato que, nos procedimentos anteriores, não se obteve sucesso, conforme apresentado no capítulo seguinte. Neste procedimento a posição do transmissor e do receptor variaram equidistantes de 2,5 em 2,5 cm da fenda. Estas leituras foram realizadas com o concreto com idade de 60 dias. Um total de 10 leituras foram realizadas em cada amostra, conforme apresentado na Figura 4.17.

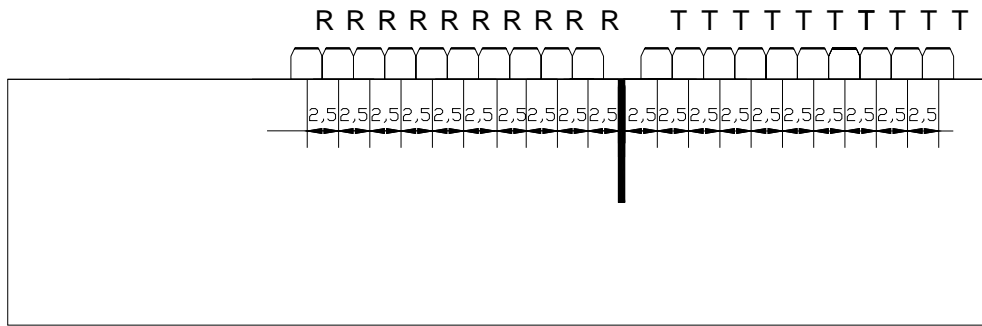


Figura 4.17 – Procedimento E – Variando transmissor e receptor com a mesma distância de 2,5 em 2,5 cm.

4.4.2 Leituras com Eco-Impacto

Para obtenção das leituras foi utilizado o equipamento *IMPACT-ECHO Instruments* fabricado pela empresa americana LLC de Ithaca, New York (Figura 4.18).



Figura 4.18 - Aparelho *IMPACT-ECHO* utilizado nos ensaios.

4.4.2.1 Parâmetros adotados para ensaio

- Esferas de aço para impacto

Para definição dos parâmetros do ensaio na estimativa da profundidade das fendas foram testadas esferas de aço de diâmetro de 5 a 12,5 mm, correspondentes a tempos de contato entre 22 e 55 μ s, conforme descrito no item 3.4.2.2. Foram testadas estas esferas em uma mesma amostra 4, que apresentava profundidade real da fenda de 10 cm. Em todos os ensaios foi posicionado o transdutor-receptor a 50 mm antes da fenda e o transdutor-transmissor 100 mm depois da fenda. A esfera de aço foi posicionada a 50 mm depois da fenda

- Posicionamento dos transdutores e do impacto

Também foi testada a posição dos transdutores em relação ao ponto de impacto variando de 5 a 10 cm, conforme descrito no item 3.4.2.2, com uma mesma esfera de aço. Estes ensaios também foram realizados na amostra 4, profundidade real da fenda de 10 cm. Em cada ensaio foi considerado a distância X igual para a posição do transdutor-receptor, transdutor-transmissor e o impacto com a esfera de aço conforme o item 3.4.2.

- Mostrador digital e escalas

O tempo de aquisição de dados utilizado sempre foi de 2 μ s. No visor digital fornecido pela tela do computador, a escala vertical da onda superior utilizada foi de 0.1 volts e a escala vertical da onda inferior de 0.04 volts para todos os ensaios realizados nas amostras. Este parâmetro foi utilizado para que as curvas obtidas e o posicionamento dos cursores fossem sempre da mesma forma, ou seja, a utilização do operador sempre foi à mesma.

4.4.2.2 Determinação da velocidade das ondas

Para obtenção da velocidade da onda foram realizados dois processos:

- Utilizando transdutores fixos a 30 cm, com esfera de aço acoplada para impacto.
- Procedimento B ASTM C 1383 – Impacto a $< 0,4 \times T$ com esfera de aço de diâmetro de 8 mm, conforme item 2.4.6.1.

Conforme descrito no item 3.4.2, o tempo de chegada de uma onda de tensão (onda P ou onda R) a dois transdutores a uma distância fixa de 300 mm, a velocidade V_p é obtida pela Eq. 3.21. Já para obter a estimativa da velocidade pelo procedimento B da ASTM utilizam-se as equações descritas no item 2.4.4

O Procedimento A ASTM C 1383 não pode ser realizado devido ao tamanho da amostra não comportar as distâncias estabelecidas nesta norma.

4.4.2.3 Estimativa da profundidade da fenda

Depois de definidos os parâmetros descritos no item 4.4.2.1, foram utilizados para todas as amostras a distância entre transdutores e impacto de 7,5 cm e a esfera de aço (impactador) de 11 mm. Na amostra 1 ($h=2,5$ cm) foi necessária uma modificação na distância dos transdutores e do impacto, sendo utilizado 5 cm para obter resultados com formas de onda esperadas.

As leituras foram obtidas conforme descrito no item 3.4.2 Da mesma forma que as leituras obtidas com o ultra-som, traçando-se uma linha de referência distante 8 cm da borda da amostra e realizadas pelo menos dez leituras.

CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no programa experimental, juntamente com sua análise. Inicialmente verificou-se que, após a desforma das amostras, ocorreram pequenas variações nas dimensões esperadas das fendas, devido à movimentação das chapas de aço. As fendas tiveram que ser abertas em uma das laterais ficando assim com a profundidade menor em relação à esperada, logo, realizaram-se as leituras mais próximas à profundidade real conforme a Figura 4.10. Os valores reais foram medidos, estando apresentados esquematicamente nas Figuras 5.1 a 5.7. O detalhe superior às figuras apresenta a real profundidade de cada fenda por amostra, com isto buscou-se realizar as leituras na região mais próxima da profundidade real, ou seja, a uma distância de 8 cm da borda direita da amostra.

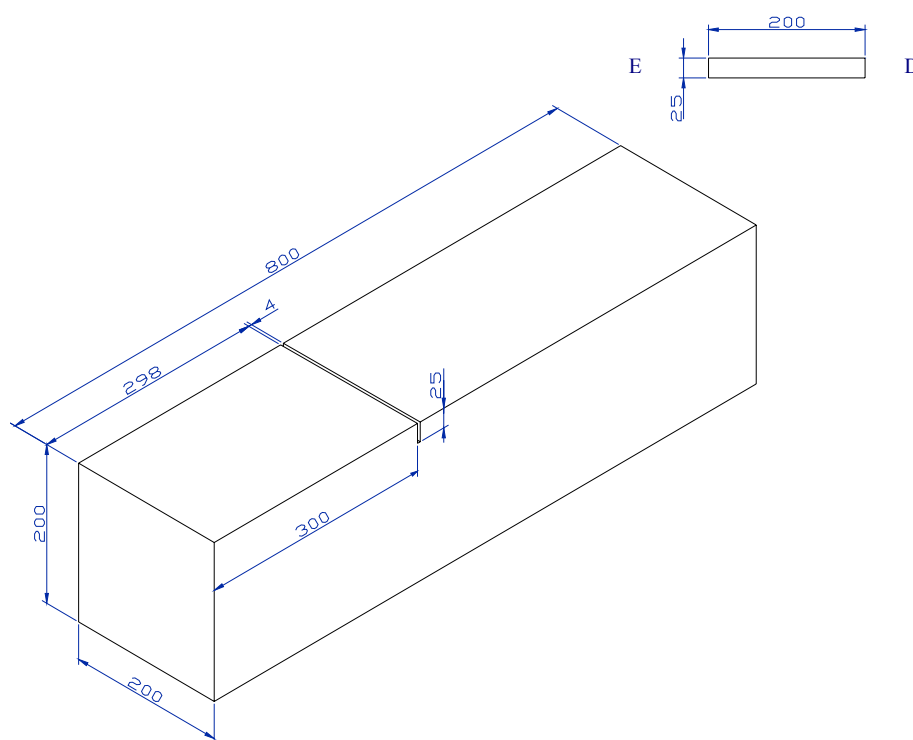


Figura 5.1 – Amostra 1 – Dimensões reais após a concretagem.

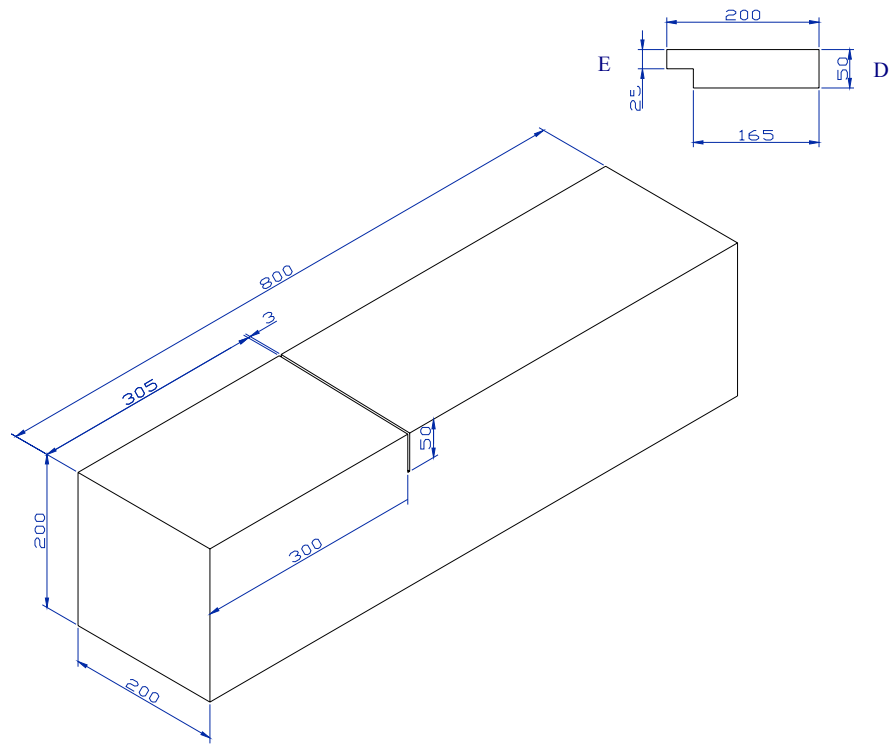


Figura 5.2 – Amostra 2 – Dimensões reais após a concretagem.

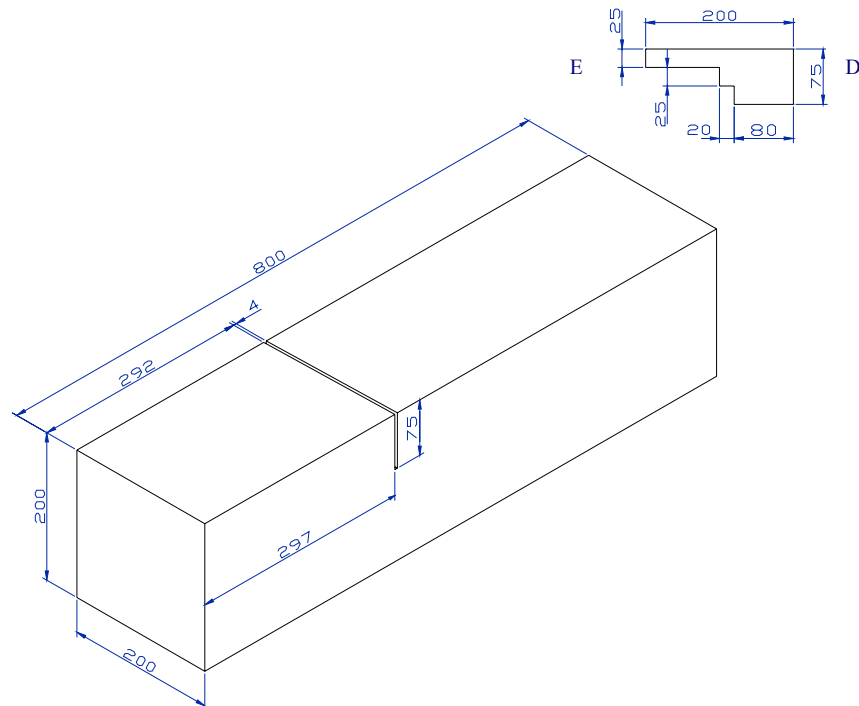


Figura 5.3 – Amostra 3 – Dimensões reais após a concretagem.

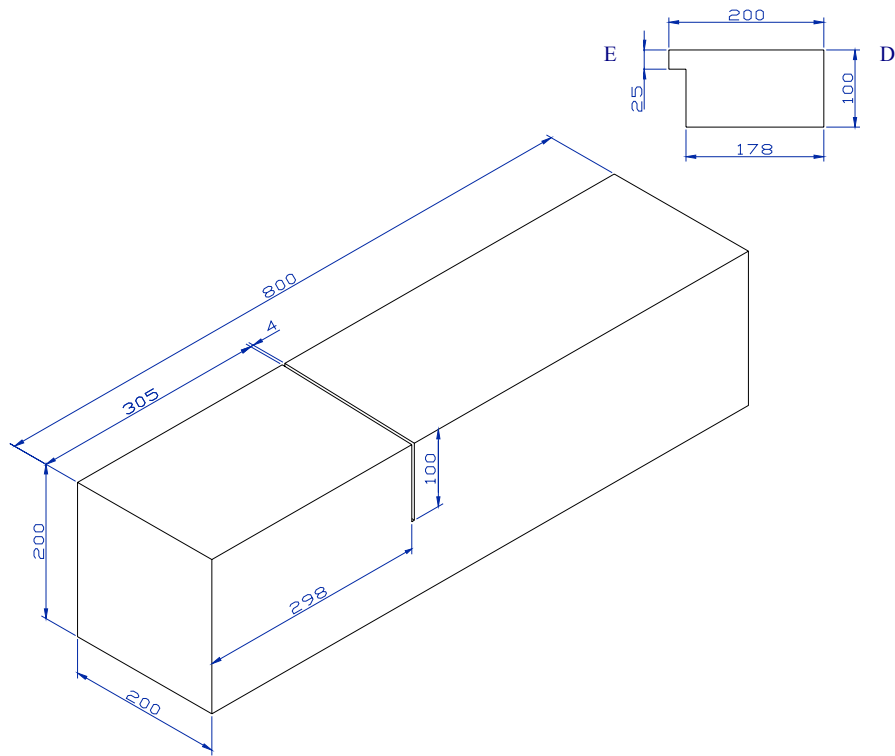


Figura 5.4 – Amostra 4 – Dimensões reais após a concretagem.

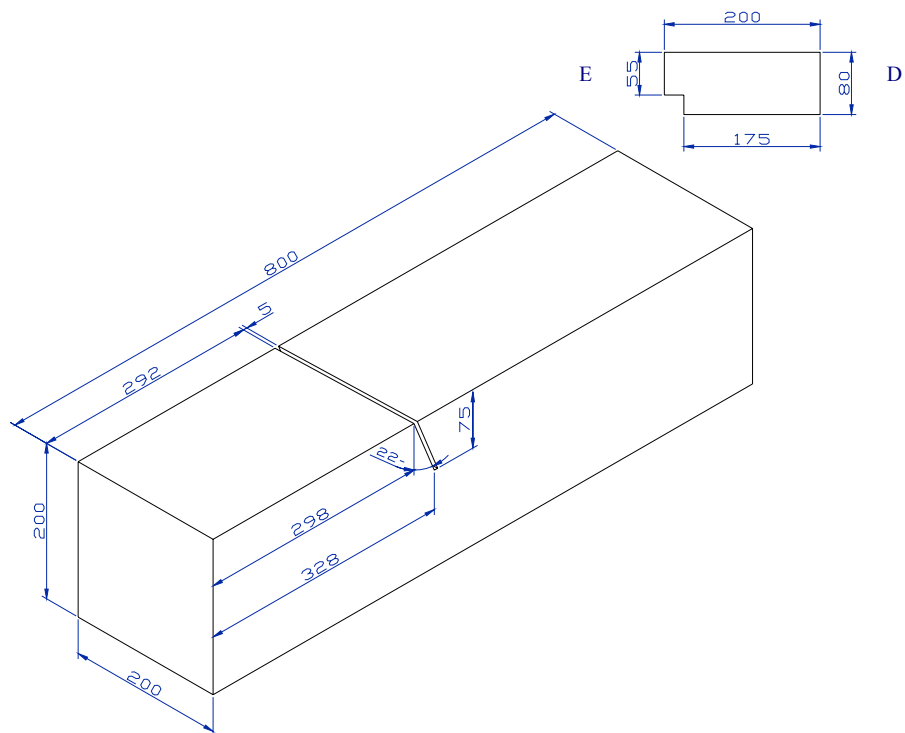


Figura 5.5 – Amostra 5 – Dimensões reais após a concretagem.

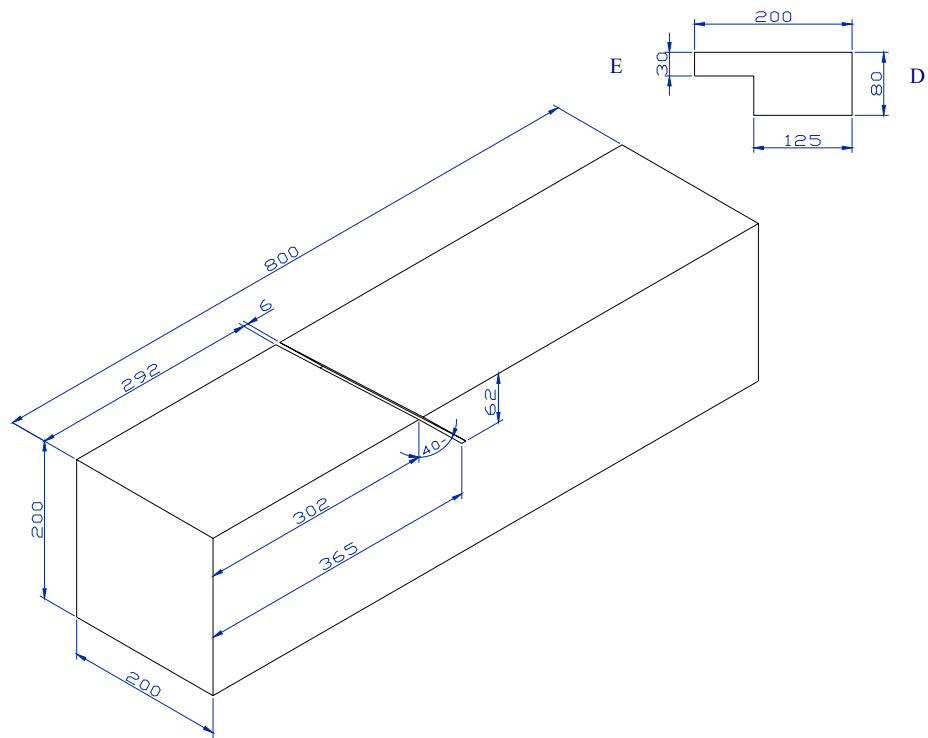


Figura 5.6 – Amostra 6 – Dimensões reais após a concretagem.

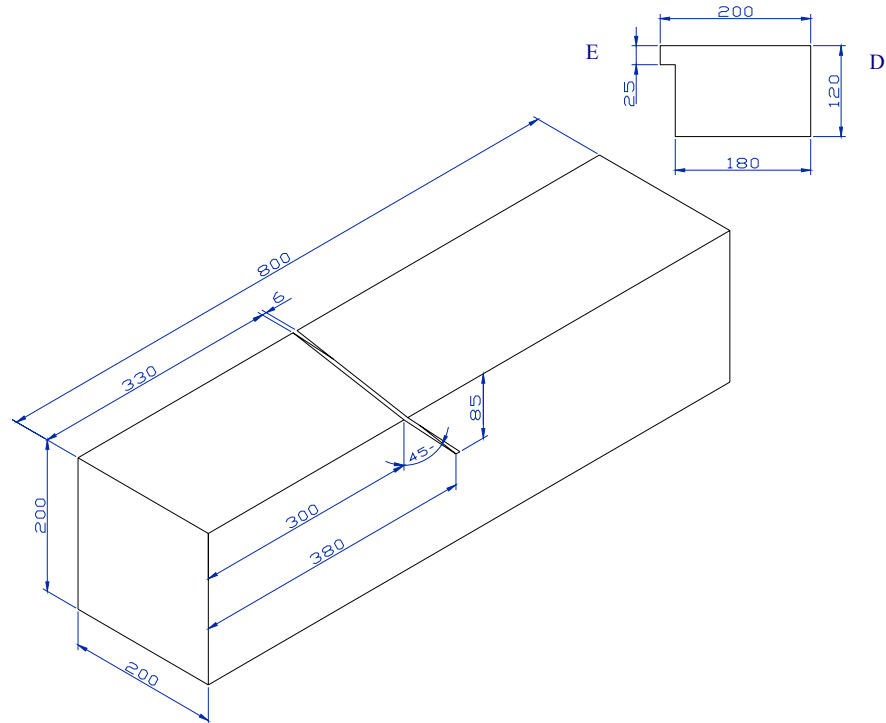


Figura 5.7 – Amostra 7 – Dimensões reais após a concretagem.

5.1 UTILIZAÇÃO DO ULTRA-SOM

5.1.1 Velocidade de propagação pelo modo de transmissão indireta

As Figuras 5.8 a 5.14 apresentam graficamente as leituras obtidas do tempo de propagação para cada distância entre transdutores para cada amostra. As regressões lineares para cada seqüência de leitura também estão apresentadas nestes gráficos. Os valores das leituras individuais obtidos estão apresentados no Anexo E.

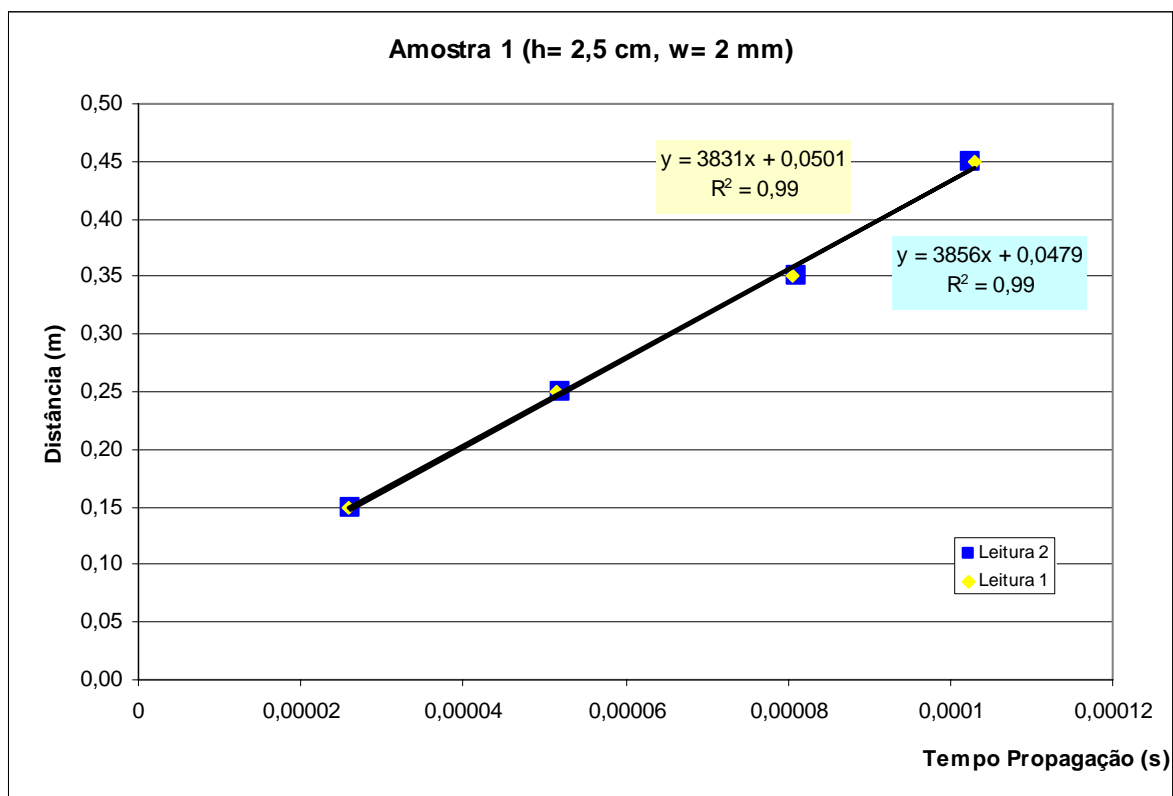


Figura 5.8 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 1.

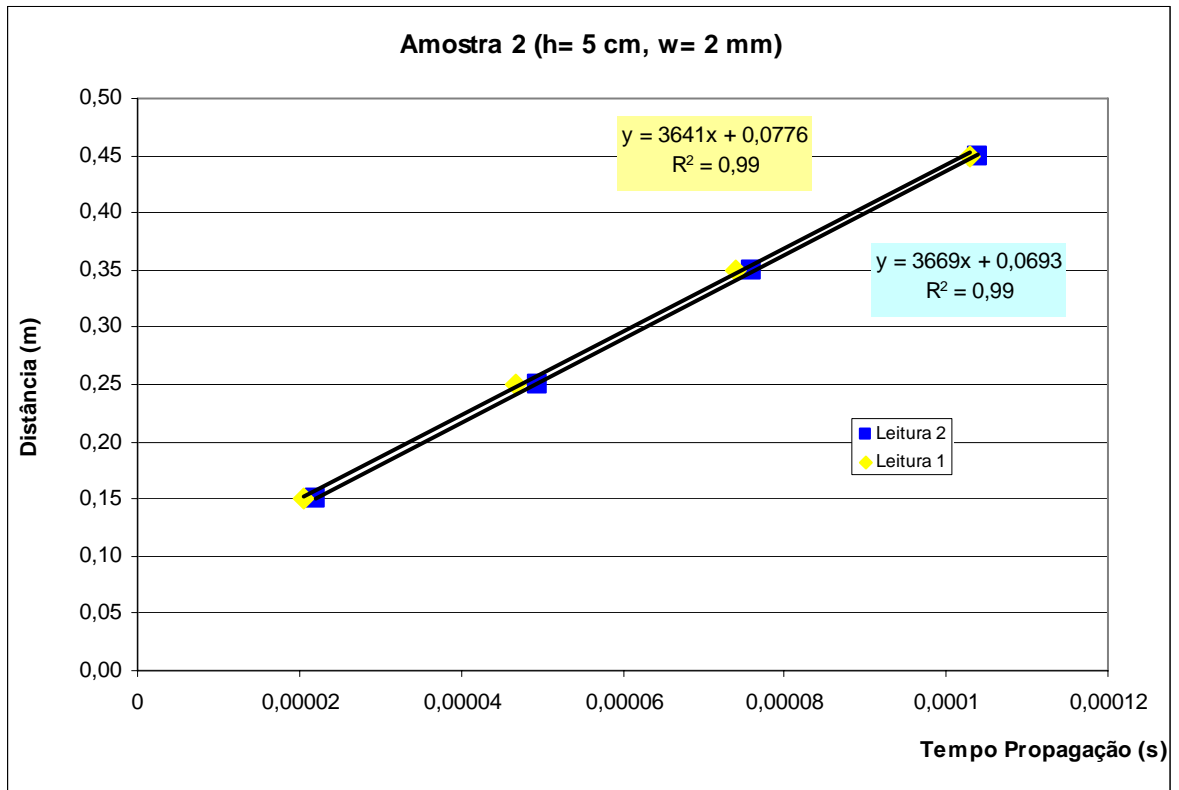


Figura 5.9 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 2.

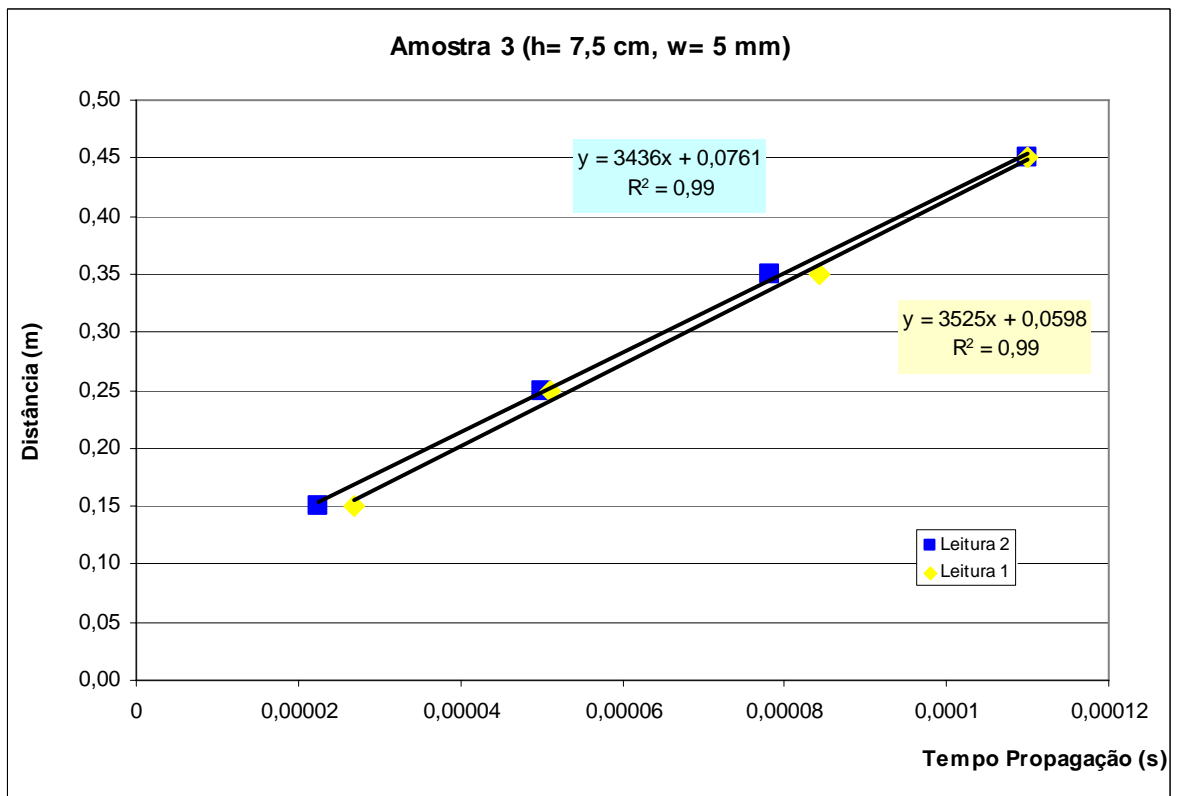


Figura 5.10 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 3.

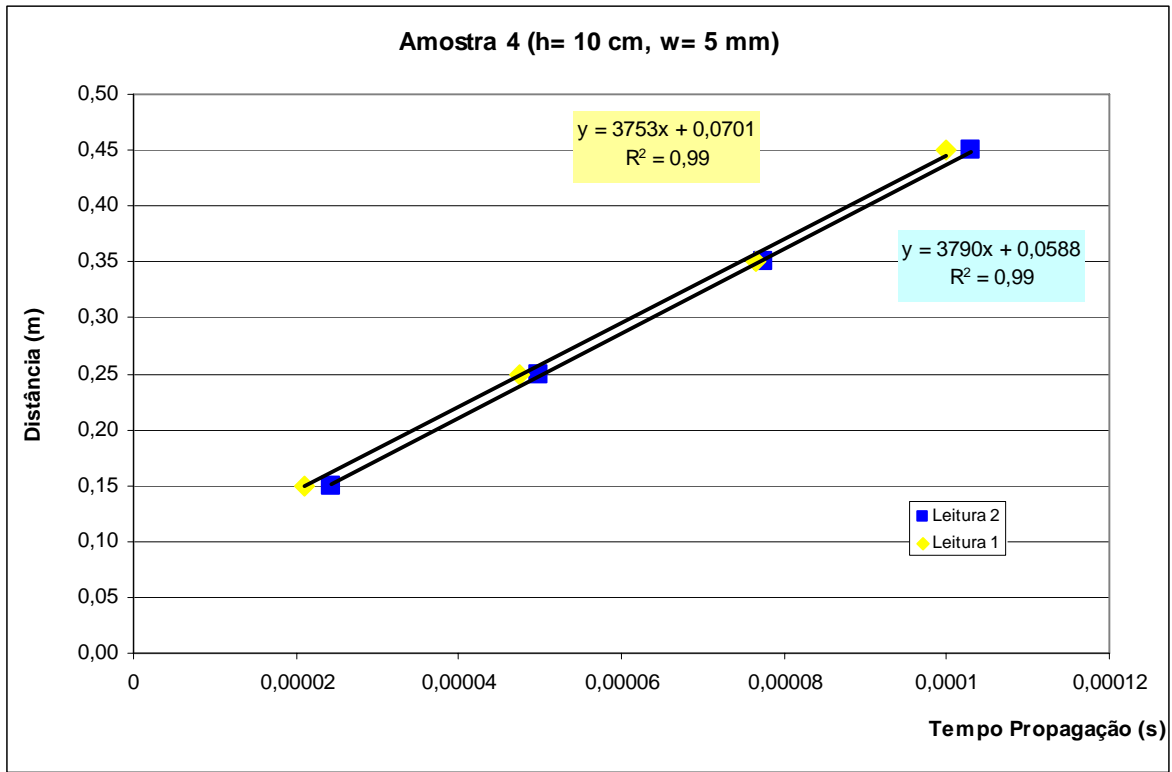


Figura 5.11 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 4.

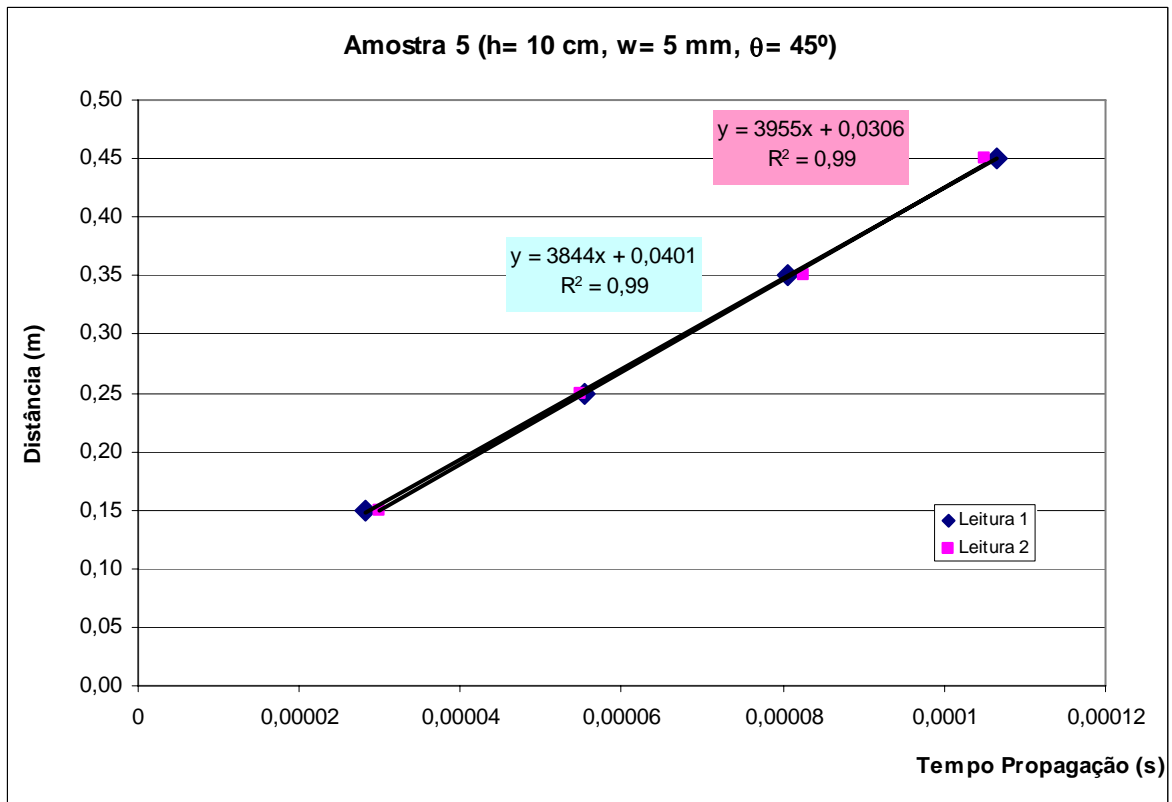


Figura 5.12 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 5.

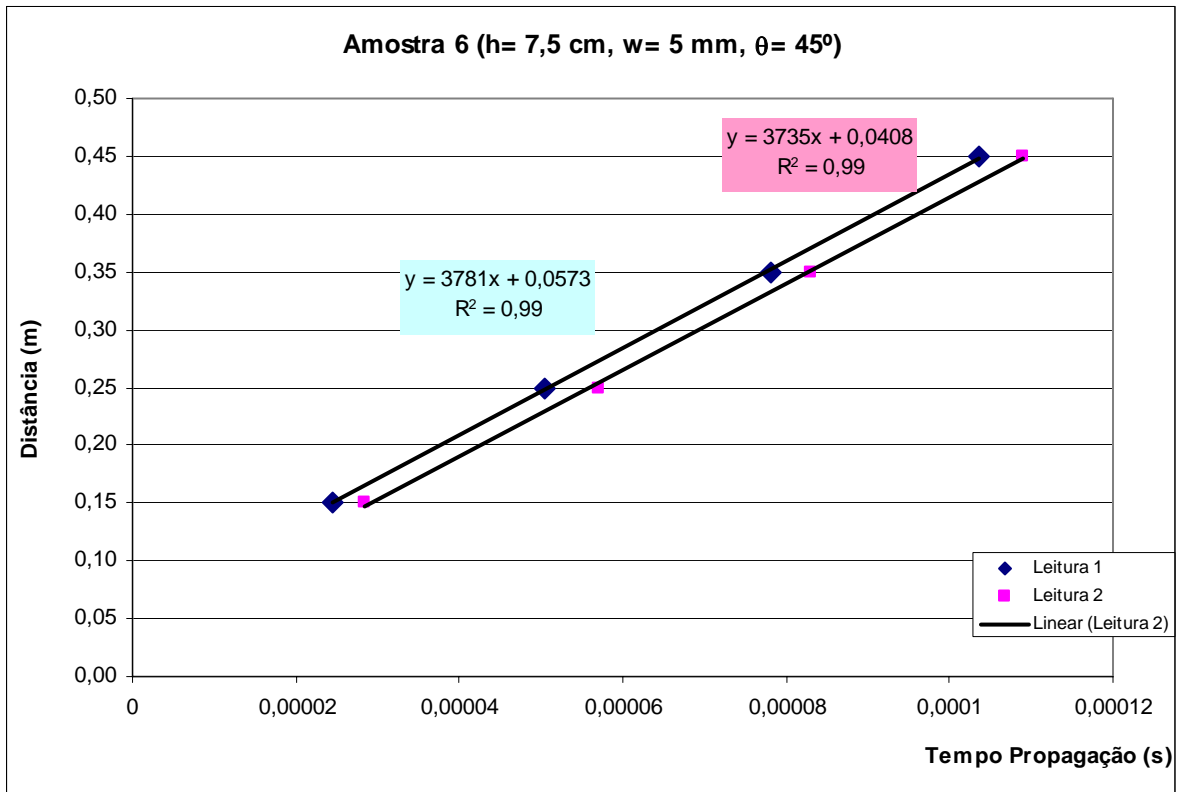


Figura 5.13 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 6.

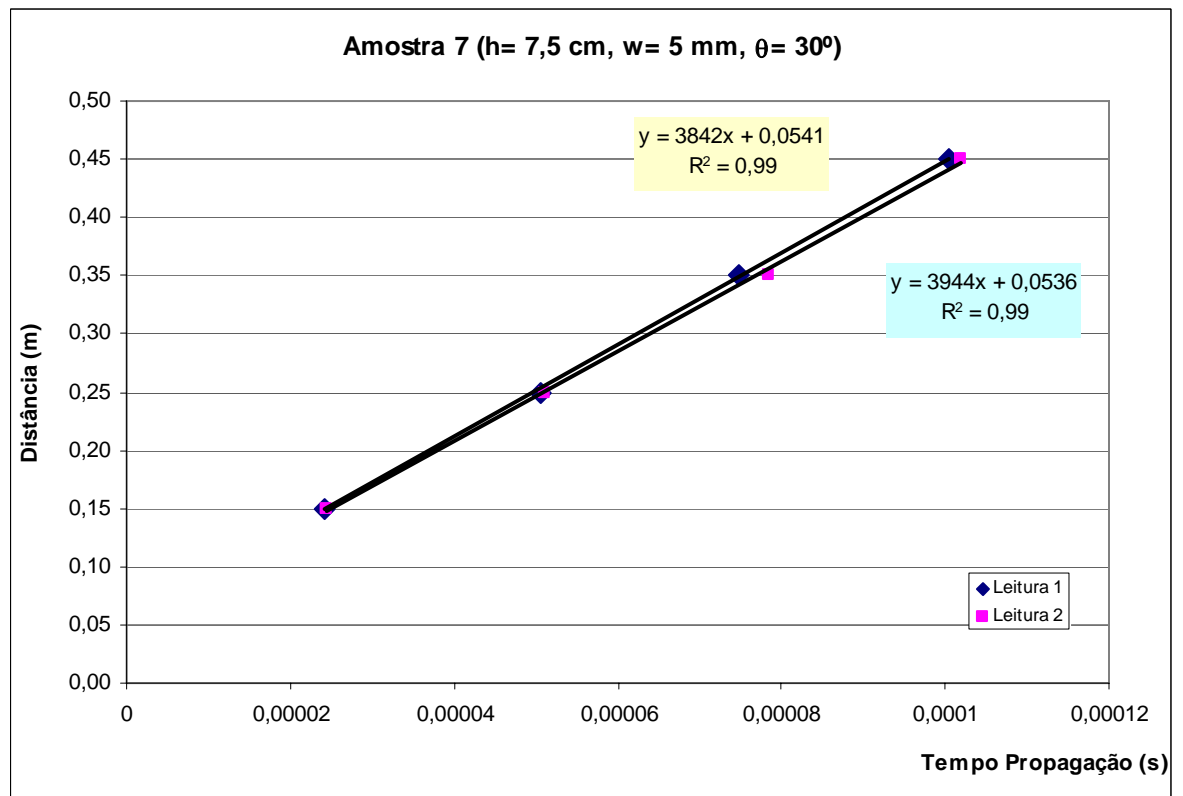


Figura 5.14 – Curva para obtenção da velocidade de propagação da onda – Amostra 7.

Observa-se uma linearidade quase perfeita entre os valores da mesma seqüência de leitura. A Tabela 5.1 apresenta o resumo das velocidades calculadas para cada amostra como a média aritmética das seqüências de leituras.

Tabela 5.1 – Resumo das velocidades obtidas pelo método indireto.

Amostra	Velocidade (m/s)		
	Leitura 1	Leitura 2	Média
1	3831	3856	3844
2	3669	3641	3655
3	3436	3525	3481
4	3754	3790	3772
5	3955	3844	3900
6	3781	3735	3758
7	3842	3944	3893

5.1.2 Estimativa da Profundidade de Fendas Verticais

Os procedimentos descritos no item 4.4.1.1 foram aplicados nas amostras 1 a 4 para avaliação das profundidades das fendas verticais. Sendo que os procedimentos A, B, C e D foram realizados em todas as quatro amostras enquanto o procedimento E foi realizado somente na amostra 1 (2,5 cm). Para os procedimentos de leitura com os dois transdutores movendo-se em ambas as faces (procedimentos D e E), avaliou-se h a partir dos modelos matemáticos de Bungey (modelo 1), da BS (modelo 2) e o modelo equidistante proposto por Pinto, Medeiros e Padaratz (2007) descritos no item 3.4.1.2. Para os procedimentos de leitura em que o transdutor-transmissor era fixo, movendo-se o transdutor receptor (Procedimentos A, B e C) utilizou-se o modelo linear proposto por Pinto, Medeiros e Padaratz para avaliação de h .

5.1.2.1 Amostra 1 - Fenda de $h = 2,5$ cm

A Tabela 5.2 apresenta os valores obtidos nas leituras para os procedimentos A, B e C.

Tabela 5.2 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento A, B e C – Amostra 1.

Receptor (cm)	Procedimento A Transmissor a 5 cm		Procedimento B Transmissor a 10 cm		Procedimento C Transmissor a 10 cm	
	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)
5	32,1	32,4	-	-	-	-
10	44	44,5	58,5	57,6	57,5	58,3
15	56,7	57,8	-	-	69,2	70,6
20	68,8	71,9	82	88,9	81	83,8
25	83,2	87,5	-	-	93,6	94,9
30	97,9	100,2	111,1	110	105,8	107
35	111,3	112,4	-	-	118	119,4
40	120,4	121,5	134,2	135,6	130	130,5
45	133,4	133	-	-	143,5	145

A Tabela 5.3 apresenta os valores obtidos nas leituras para os procedimentos D e E.

Tabela 5.3 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D e E – Amostra 1.

Transmissor - Receptor (cm)	Procedimento D		Procedimento E	
	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)
2,5-2,5	-	-	50,4	50
5-5	33,3	33,1	36,5	38,4
7,5-7,5	-	-	47,5	48,3
10-10	58,9	57	60,3	57,5
12,5-12,5	-	-	73,1	71,7
15-15	80,7	87,5	80	85,5
17,5-17,5	-	-	96,8	95,7
20-20	112,4	105,5	109	109,3
22,5-22,5	-	-	123,6	123
25-25	133,4	132,4	133,5	131,6

- Modelo 1 (Bungey, 1989)

Neste modelo de Bungey utilizou-se a velocidade obtida pelo método indireto apresentado na Tabela 5.1, com o valor de 3.844 m/s. A Tabela 5.4 apresenta os resultados da estimativa dos h obtidos.

Tabela 5.4 – Estimativa de “h” para modelo 1.

Vc (m/s)	Transmissor - Receptor	Procedimento D			Procedimento E		
		h ₁	h ₂	h _m (cm)	h ₁	h ₂	h _m (cm)
3.844	2,5-2,5	-	-	-	9,4	9,3	9,3
	5-5	4,0	3,9	4,0	4,9	5,4	5,2
	7,5-7,5	-	-	-	5,2	5,5	5,3
	10-10	5,3	4,5	4,9	5,9	4,7	5,3
	12,5-12,5	-	-	-	6,4	5,8	6,1
	15-15	3,9	7,6	5,8	3,4	6,7	5,0
	17,5-17,5	-	-	-	6,3	5,7	6,0
	20-20	8,2	3,3	5,8	6,2	6,4	6,3
	22,5-22,5	-	-	-	7,6	7,2	7,4
	25-25	5,7	4,8	5,2	5,8	3,8	4,8
Média		5,1			6,1		
Coeficiente de Variação		15%			23%		

- Modelo 2 (BS, 1986)

A Tabela 5.5 apresenta a estimativa de h pelo modelo 2 para as combinações de leituras apresentadas.

Tabela 5.5 – Estimativa de “h” para modelo 2.

Combinação		Procedimento D			Procedimento E		
Transmissor - Receptor	Transmissor - Receptor	h ₁	h ₂	h _m (cm)	h ₁	h ₂	h _m (cm)
5-5	10-10	3,2	3,6	3,4	4,3	5,9	5,1
	15-15	4,0	2,9	3,5	5,3	5,1	5,2
	20-20	3,3	4,0	3,7	4,7	5,3	5,0
	25-25	3,9	3,9	3,9	4,8	5,4	5,1
Média		3,6			5,1		
Coeficiente de Variação		6%			1%		

- Modelo Eqüidistante (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam os gráficos obtidos pelo modelo eqüidistante conforme apresentado no item 3.4.1.3, a partir dos procedimentos D e E.

Na Figura 5.16 a primeira leitura não foi considerada devido ser maior que a segunda leitura, ocorrendo uma discrepância nos valores, logo foi considerada as leituras com o transdutor e receptor a partir de 5 cm.

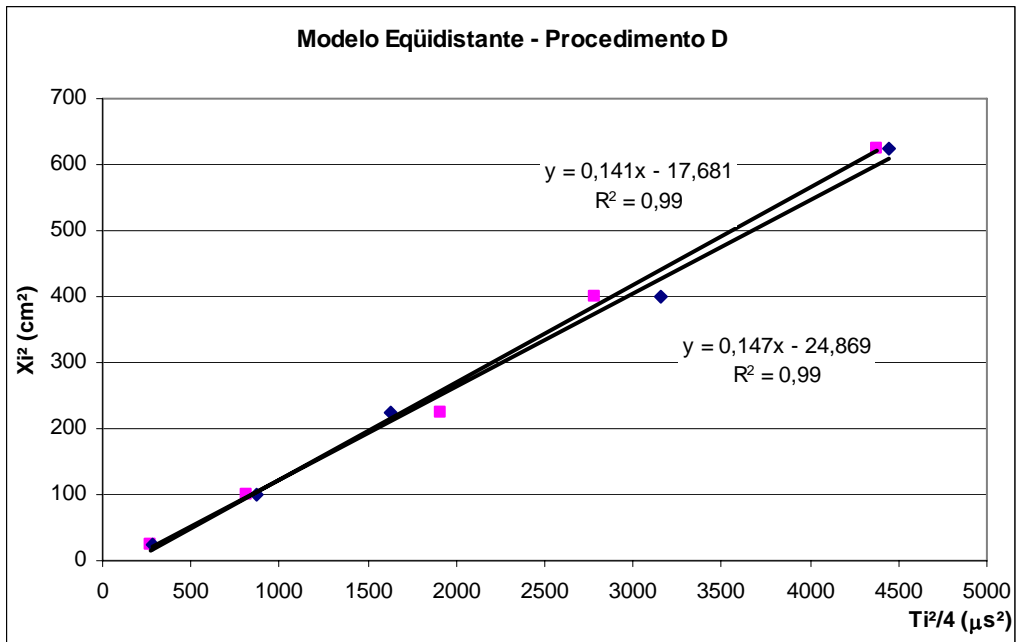


Figura 5.15 – Curva Modelo Equidistante - Procedimento D - Amostra 1.

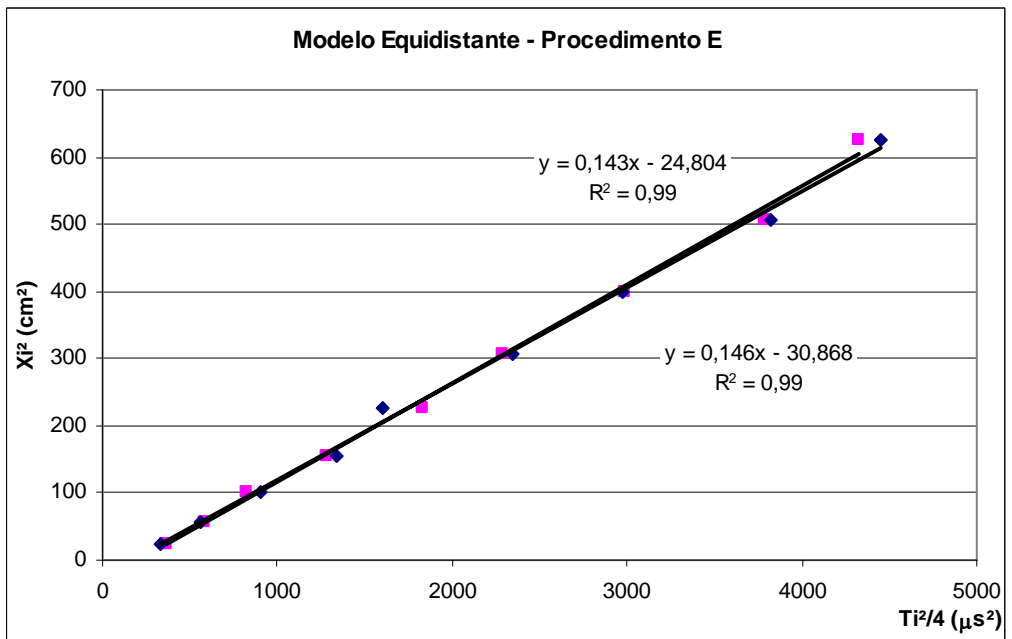


Figura 5.16 – Curva Modelo Equidistante - Procedimento E - Amostra 1.

A Tabela 5.6 apresenta a estimativa de h e de V a partir dos coeficientes angulares e a intersecção das expressões lineares apresentados nas Figuras 5.15 e 5.16.

Tabela 5.6 – Estimativa de “h” para modelo equidistante.

	Procedimento D			Procedimento E		
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	17,681	24,869		24,804	30,868	
$h(\text{cm})$	4,205	4,987	4,60	4,980	5,556	5,27
V^2	0,146	0,148		0,143	0,147	
$V(\text{m/s})$	3821	3841	3831	3783	3828	3805

- Modelo Linear (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

As Figuras 5.17 a 5.19 apresentam os gráficos obtidos pelo modelo linear conforme apresentado no item 3.4.1.3.

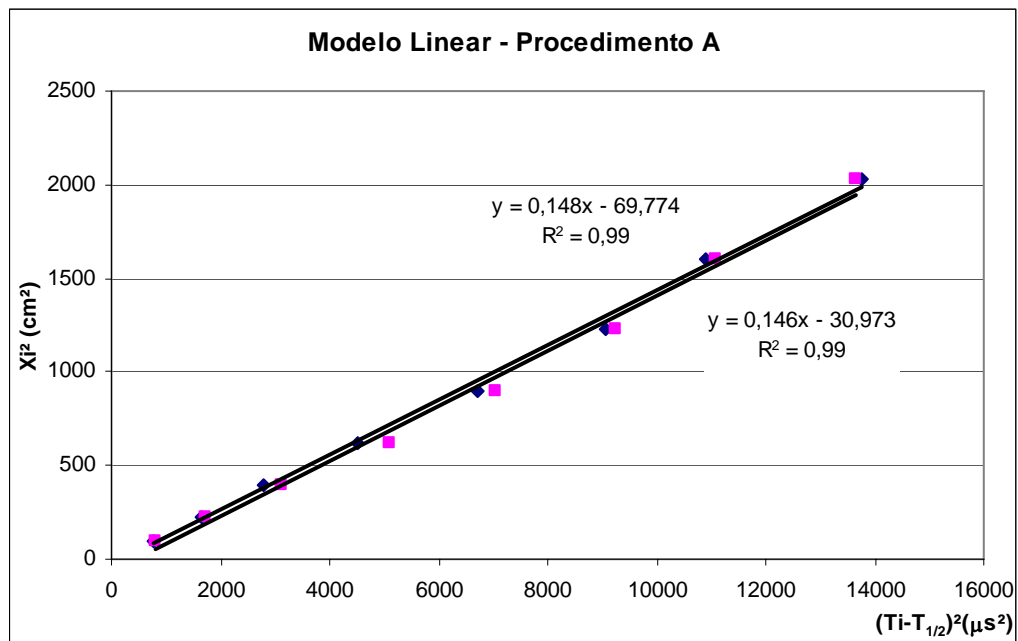


Figura 5.17 – Curva Modelo Linear - Procedimento A - Amostra 1.

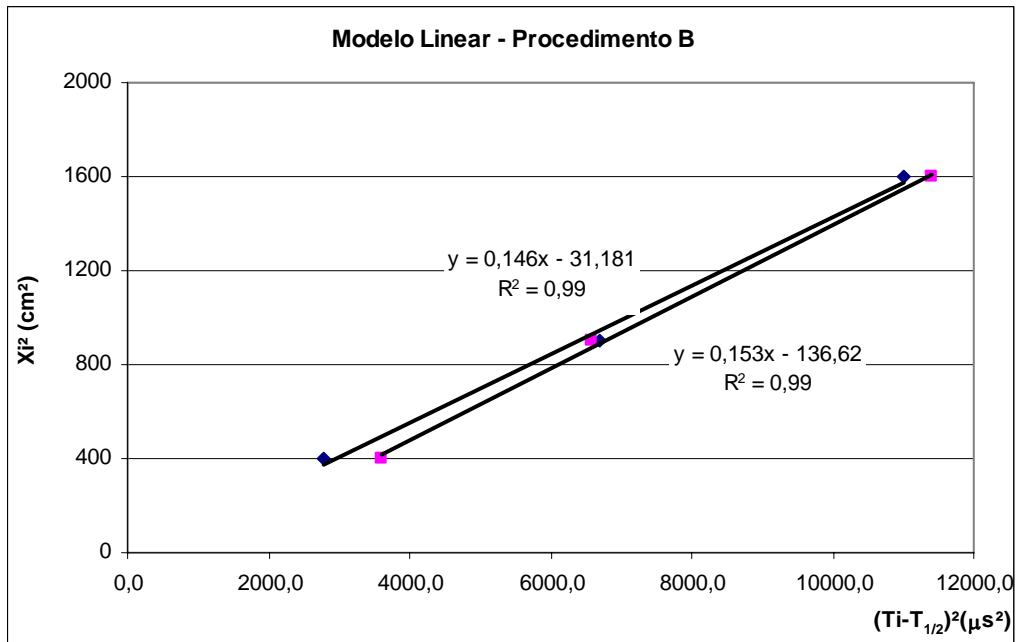


Figura 5.18 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 1.

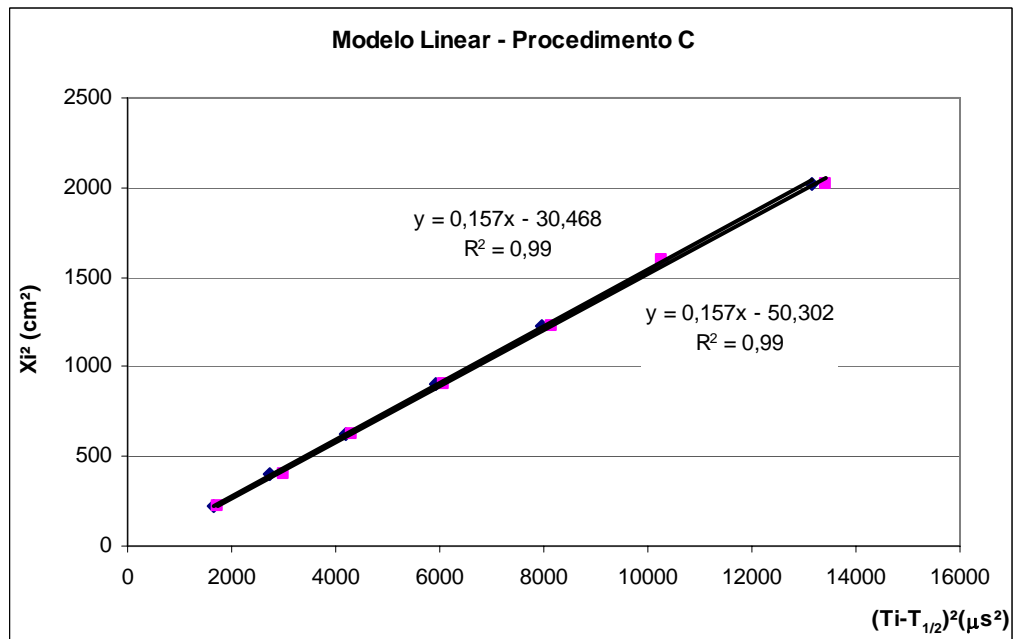


Figura 5.19 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 1.

A Tabela 5.7 apresenta a estimativa de h e de V a partir dos coeficientes angulares e a intersecção das expressões lineares apresentados nas Figuras 5.17 a 5.19.

Tabela 5.7 – Obtenção da estimativa de “h” pelo modelo linear.

	Procedimento A			Procedimento B			Procedimento C		
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Leitura 1	Leitura 2	Média	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	30,973	69,774		31,181	136,620		30,468	50,302	
$h(\text{cm})$	5,565	8,353	7,0	5,584	11,688	8,6	5,520	7,092	6,3
V^2	0,147	0,148		0,146	0,153		0,157	0,157	
$V(\text{m/s})$	3828	3847	3837	3822	3914	3868	3965	3959	3962

5.1.2.2 Amostra 2 - Fenda de $h = 5,0 \text{ cm}$

A Tabela 5.8 apresenta os valores obtidos nas leituras para os procedimentos A, B e C.

Tabela 5.8 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento A, B e C – Amostra 2.

Receptor (cm)	Procedimento A Transmissor a 5 cm		Procedimento B Transmissor a 10 cm		Procedimento C Transmissor a 10 cm	
	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)
5	37	37,5	-	-	-	-
10	47,4	48	60,5	61	62	63,1
15	61,7	62,1	-	-	73,1	74,6
20	77,5	75	89,5	90	86,3	87
25	87,6	85,3	-	-	98,7	99,1
30	101	101,1	116	113	109,6	110,5
35	115	113	-	-	125,6	126
40	126	126	142,5	142,5	135,3	136,6
45	142	141	-	-	148,5	149,7

A Tabela 5.9 apresenta os valores obtidos nas leituras para o procedimento D.

Tabela 5.9 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D – Amostra 2.

Transmissor - Receptor (cm)	Procedimento D	
	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)
5-5	37,3	35,6
10-10	60,7	60
15-15	90,5	89,4
20-20	113,3	114,3
25-25	135,5	137,5

- Modelo 1 (Bungey, 1989)

Neste modelo de Bungey (modelo 1) utilizou-se a velocidade obtida pelo método indireto apresentado na Tabela 5.1, com o valor de 3.655 m/s. A Tabela 5.10 apresenta os resultados da estimativa dos h obtidos.

Tabela 5.10 – Estimativa de “h” para modelo 1.

Vc (m/s)	Transmissor - Receptor	Procedimento D		
		h ₁	h ₂	h _m (cm)
3.655	5-5	4,5	4,2	4,4
	10-10	4,0	4,5	4,6
	15-15	4,5	6,5	6,7
	20-20	4,9	6,0	5,7
Média		5,4		
Coeficiente de Variação		20%		

- Modelo 2 (BS, 1986)

A Tabela 5.11 apresenta a estimativa de h pelo modelo 2 para as combinações de leituras apresentadas.

Tabela 5.11 – Estimativa de “h” para modelo 2.

Combinação		Procedimento D		
Transmissor - Receptor	Transmissor - Receptor	h ₁	h ₂	h _m (cm)
5-5	10-10	4,5	4,0	4,2
	15-15	4,0	3,6	3,8
	20-20	4,5	3,9	4,2
	25-25	4,9	4,3	4,6
Média		4,2		
Coeficiente de Variação		8%		

- Modelo Eqüidistante (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

A Figura 5.20 apresenta o gráfico obtido pelo modelo eqüidistante conforme apresentado no item 3.4.1.3.

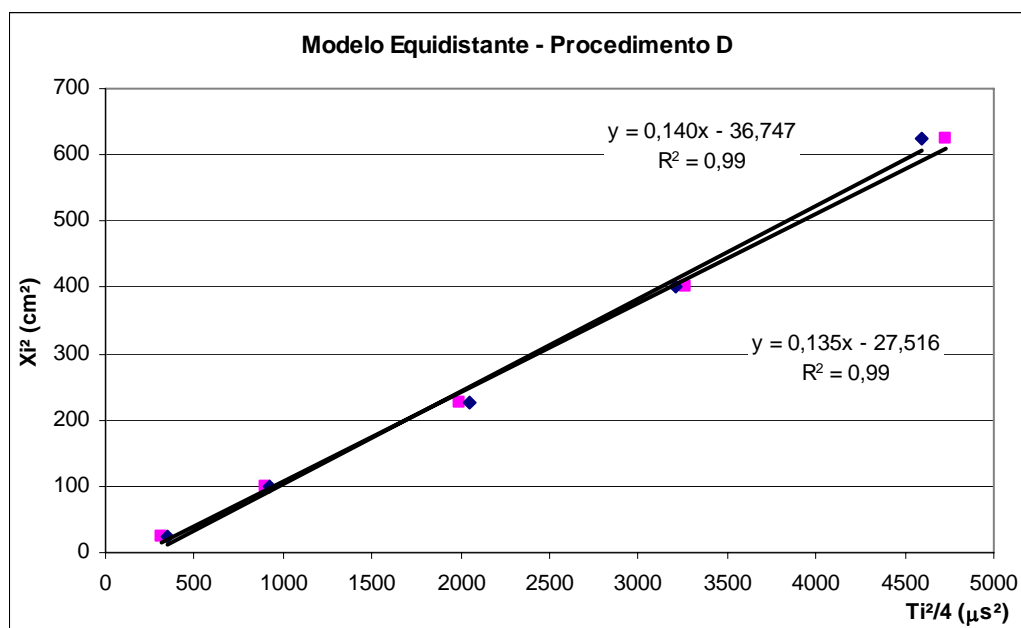


Figura 5.20 – Curva Modelo Equidistante - Procedimento D - Amostra 2.

A Tabela 5.12 apresenta a estimativa de h e de V a partir do coeficiente angular e a intersecção da expressão linear apresentado na Figura 5.20.

Tabela 5.12 – Estimativa de “h” para modelo equidistante.

	Procedimento D		
	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	27,516	36,747	
$h(cm)$	5,246	6,062	5,7
V^2	0,135	0,140	
$V(m/s)$	3674	3744	3709

- Modelo Linear (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

As Figuras 5.21 a 5.23 apresentam os gráficos obtidos pelo modelo linear conforme apresentado no item 3.4.1.3.

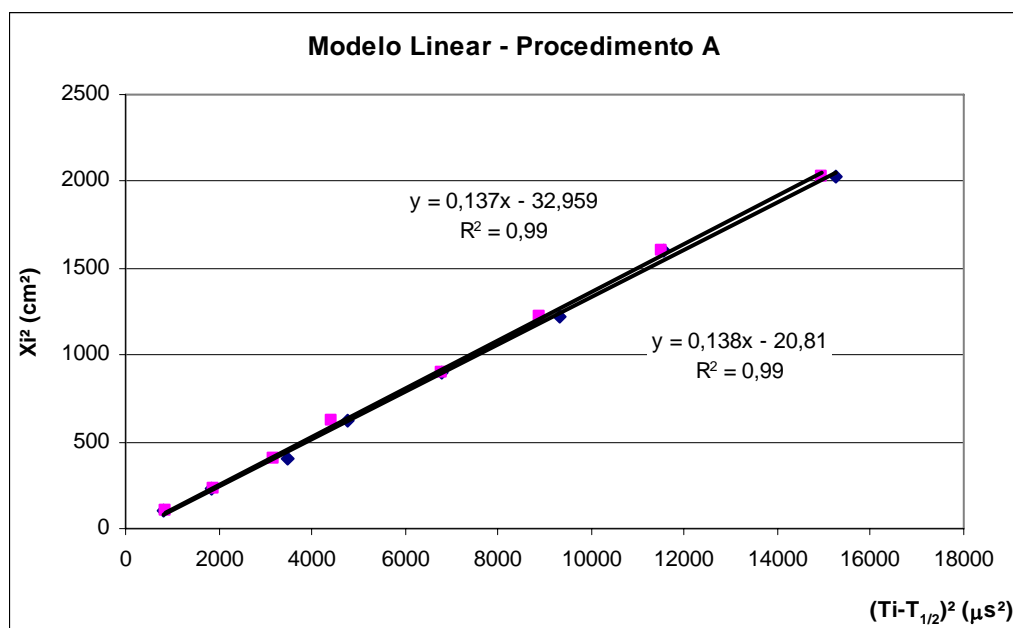


Figura 5.21 – Curva Modelo Linear - Procedimento A - Amostra 2.

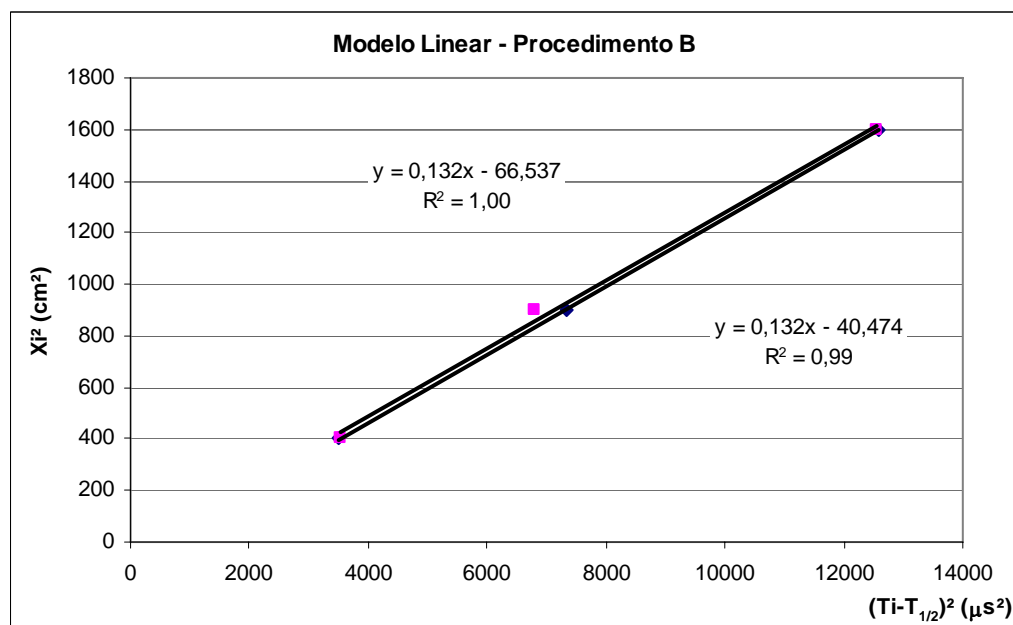


Figura 5.22 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 2.

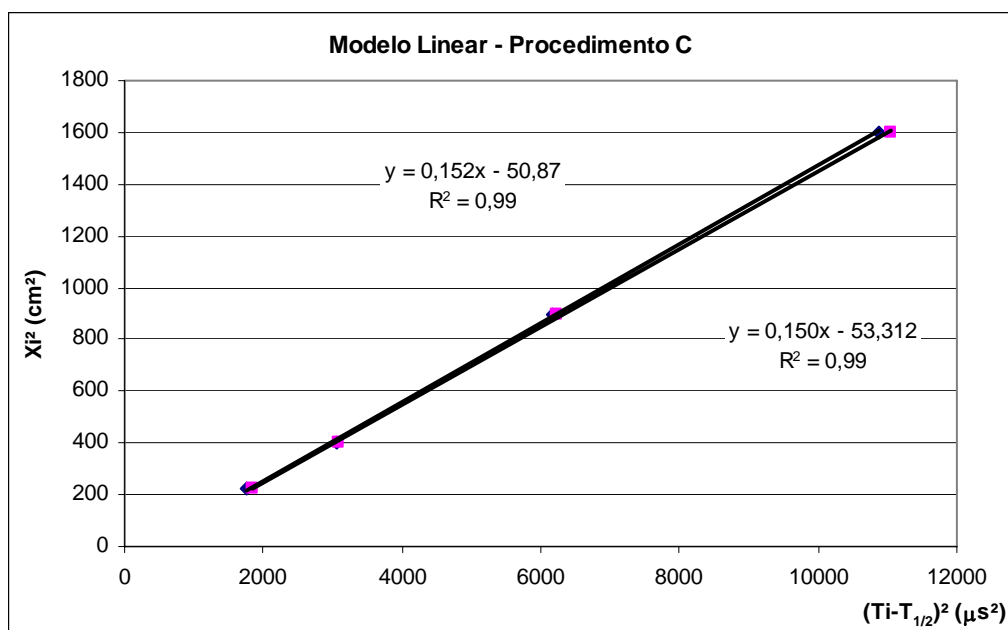


Figura 5.23 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 2.

A Tabela 5.13 apresenta a estimativa de h e de V a partir dos coeficientes angulares e a intersecção das expressões lineares apresentados nas Figuras 5.21 a 5.23.

Tabela 5.13 – Obtenção da estimativa de “ h ” pelo modelo linear.

	Procedimento A			Procedimento B			Procedimento C		
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Leitura 1	Leitura 2	Média	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	32,959	20,810		66,537	40,474		52,731	51,888	
h (cm)	5,741	4,562	5,2	8,157	6,362	7,3	7,262	7,203	7,2
V^2	0,137	0,139		0,132	0,132		0,150	0,148	
V (m/s)	3697	3723	3710	3635	3633	3634	3869	3851	3860

5.1.2.3 Amostra 3 - Fenda de $h = 7,5$ cm

A Tabela 5.14 apresenta os valores obtidos nas leituras para os procedimentos A, B e C.

Tabela 5.14 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento A, B e C – Amostra 3.

Receptor (cm)	Procedimento A Transmissor a 5 cm		Procedimento B Transmissor a 10 cm		Procedimento C Transmissor a 10 cm	
	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)
5	71,3	72,5	-	-	-	-
10	49,5	50	62	66	68,5	69,4
15	64,2	63,5	-	-	78,7	79,1
20	75	76,5	89	89,5	89,6	90,8
25	89,9	89,7	-	-	101	101,4
30	100,5	101	112,3	113	114,9	116,6
35	114,5	113,3	-	-	126,8	128
40	126,1	125	136,5	139,3	138,5	139,8
45	142,4	141,1	-	-	149,5	151

A Tabela 5.15 apresenta os valores obtidos nas leituras para o procedimento D.

Tabela 5.15 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D – Amostra 3.

Transmissor - Receptor (cm)	Procedimento D	
	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)
5-5	75,5	73,1
10-10	69,5	69,5
15-15	89,6	90
20-20	113	116
25-25	142	141

Conforme a Tabela 5.15 a primeira leitura é maior que a segunda, Medeiros (2007) já tinha concluído, conforme descrito no item 3.4.1.3, que existe uma relação máxima e mínima da profundidade da fenda (h) sobre a distância do eixo dos transdutores (X) de tal forma que as estimativas são possíveis para relações de $X/h > 1,0$ até $X/h < 4,0$. Logo, este procedimento D de leituras só poderá ser utilizado a partir das leituras onde o transmissor e receptor estejam posicionados em 10 cm.

- Modelo 1 (Bungey, 1989)

Neste modelo de Bungey (modelo 1) utilizou-se a velocidade obtida pelo método indireto apresentado na Tabela 5.1, com o valor de 3.481 m/s. A Tabela 5.16 apresenta os resultados da estimativa dos h obtidos.

Tabela 5.16 – Estimativa de “h” para modelo 1.

Vc (m/s)	Transmissor - Receptor	Procedimento D		
		h ₁	h ₂	h _m (cm)
3.481	10-10	6,8	6,8	6,8
	15-15	4,3	4,5	4,4
	20-20	-	2,7	2,7
	25-25	-	-	-
Média		4,6		
Coeficiente de Variação		44%		

- Modelo 2 (BS, 1986)

A Tabela 5.17 apresenta a estimativa de h pelo modelo 2 para as combinações de leituras apresentadas.

Tabela 5.17 – Estimativa de “h” para modelo 2.

Combinação		Procedimento D		
Transmissor - Receptor	Transmissor - Receptor	h ₁	h ₂	h _m (cm)
10-10	20-20	9,1	8,2	8,7
Média		8,7		
Coeficiente de Variação		-		

- Modelo Equidistante (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

A Figura 5.24 apresenta o gráfico obtido pelo modelo equidistante conforme apresentado no item 3.4.1.3.

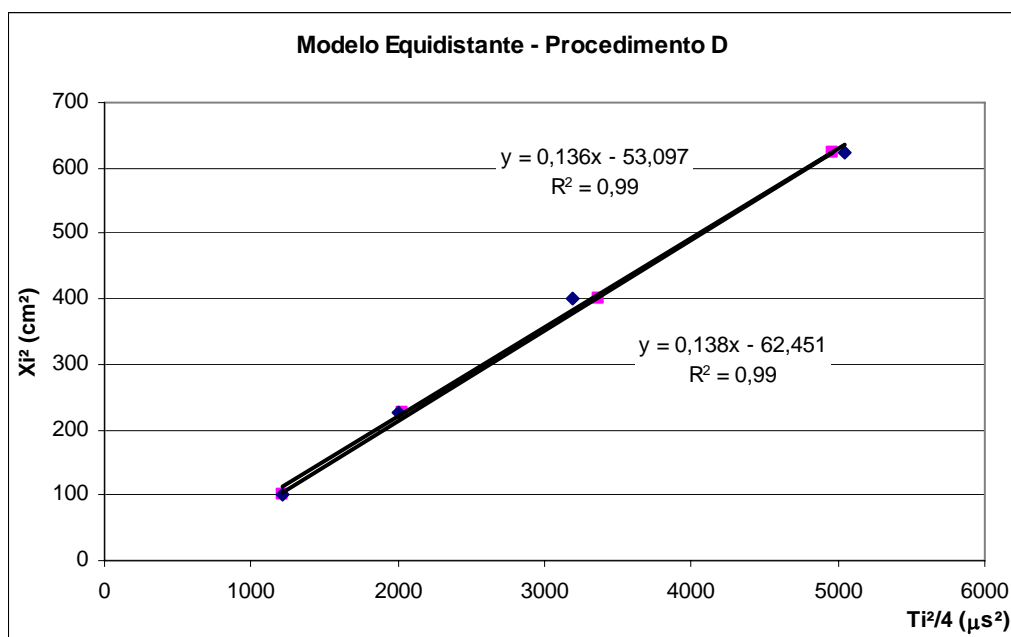


Figura 5.24 – Curva Modelo Equidistante - Procedimento D - Amostra 3.

A Tabela 5.18 apresenta a estimativa de h e de V a partir do coeficiente angular e a intersecção da expressão linear apresentado na Figura 5.24.

Tabela 5.18 – Estimativa de “ h ” para modelo equidistante.

	Procedimento D		
	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	53,097	62,451	
h (cm)	7,287	7,903	7,6
V^2	0,137	0,138	
V (m/s)	3695	3719	3707

- Modelo Linear (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

As Figuras 5.25 a 5.27 apresentam os gráficos obtidos pelo modelo linear conforme apresentado no item 3.4.1.3.

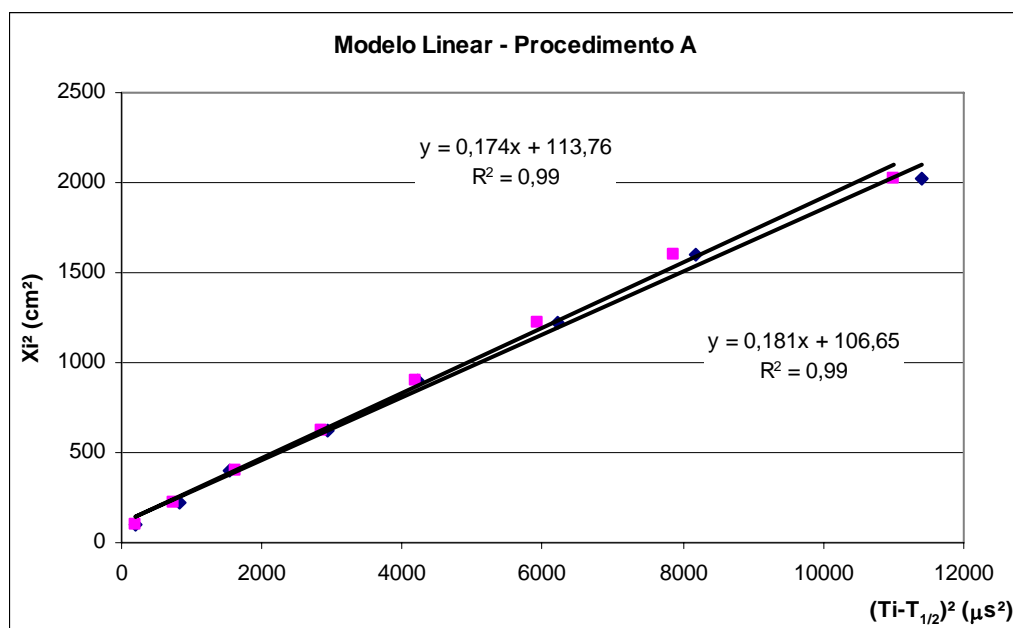


Figura 5.25 – Curva Modelo Linear - Procedimento A - Amostra 3.

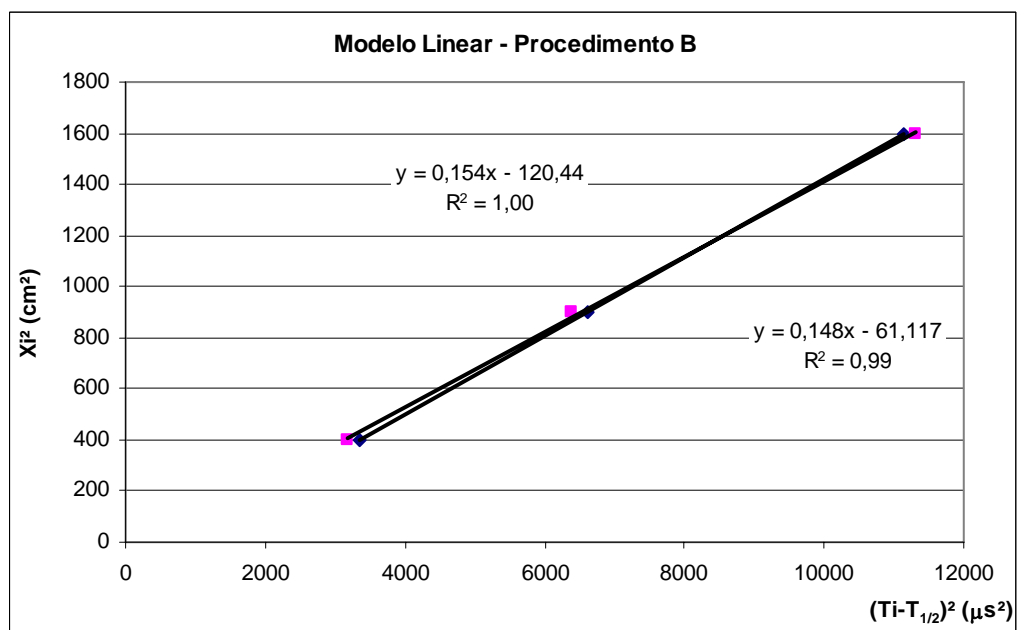


Figura 5.26 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 3.

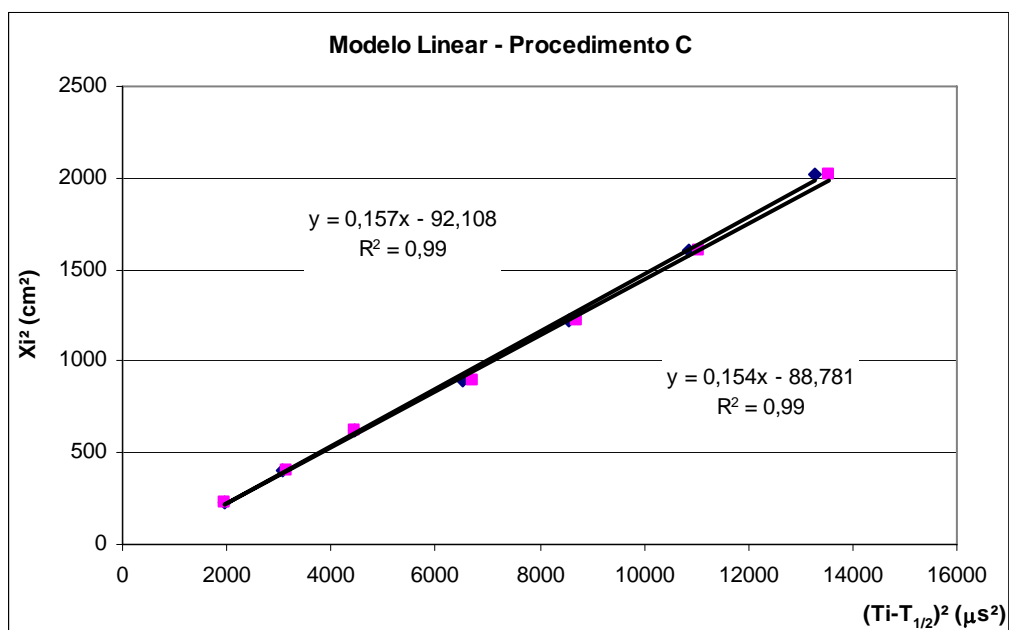


Figura 5.27 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 3.

O gráfico obtido pelo procedimento A não obteve valores coerentes, fato este devido a primeira leitura ser maior que a segunda, conforme discutido previamente, as estimativas de profundidade de fendas são possíveis para relações de $X/h > 1,0$ até $X/h < 4,0$. Logo, o procedimento A só pode ser utilizado nas amostras com $h \leq 5,0$ cm.

A Tabela 5.19 apresenta a estimativa de h e de V a partir dos coeficientes angulares e a intersecção das expressões lineares apresentados nas Figuras 5.26 e 5.27.

Tabela 5.19 – Obtenção da estimativa de “h” pelo modelo linear.

	Procedimento B			Procedimento C		
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	120,440	61,117		92,108	88,781	
h (cm)	10,975	7,818	9,4	9,597	9,422	9,5
V^2	0,155	0,148		0,157	0,154	
V (m/s)	3931	3842	3886	3961	3922	3941

5.1.2.4 Amostra 4 - Fenda de $h = 10,0$ cm

A Tabela 5.20 apresenta os valores obtidos nas leituras para os procedimentos B e C.

Tabela 5.20 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento B e C – Amostra 4.

Receptor (cm)	Procedimento B Transmissor a 10 cm		Procedimento C Transmissor a 10 cm	
	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)
10	74,7	74,2	76	78
15	-	-	87,2	87,2
20	94,8	93,8	97	99
25	-	-	105,8	105,8
30	117	117	119,8	120,5
35	-	-	133,1	134
40	141,5	141,5	145	144,5
45	-	-	159,4	159,4

A Tabela 5.21 apresenta os valores obtidos nas leituras para o procedimento D.

Tabela 5.21 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D – Amostra 4.

Transmissor – Receptor (cm)	Procedimento D	
	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)
10-10	76,5	74,7
15-15	91	92,3
20-20	114,1	115
25-25	134,2	136

- Modelo 1 (Bungey, 1989)

Neste modelo de Bungey (modelo 1) utilizou-se a velocidade obtida pelo método indireto apresentado na Tabela 5.1, com o valor de 3.772 m/s. A Tabela 5.22 apresenta os resultados da estimativa dos h obtidos.

Tabela 5.22 – Estimativa de “h” para modelo 1.

Vc (m/s)	Transmissor - Receptor	Procedimento D		
		h_1	h_2	h_m (cm)
3.772	10-10	10,4	9,9	10,2
	15-15	8,3	8,8	8,6
	20-20	7,9	8,4	8,2
	25-25	3,9	5,7	4,8
Média		7,9		
Coeficiente de Variação		28%		

- Modelo 2 (BS, 1986)

A Tabela 5.23 apresenta a estimativa de h pelo modelo 2 para as combinações de leituras apresentadas.

Tabela 5.23 – Estimativa de “ h ” para modelo 2.

Combinação		Procedimento D		
Transmissor - Receptor	Transmissor - Receptor	h_1	h_2	h_m (cm)
10-10	20-20	12,0	10,9	11,5
Média		11,5		
Coeficiente de Variação		-		

- Modelo Equidistante (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

A Figura 5.28 apresenta o gráfico obtido pelo modelo equidistante conforme apresentado no item 3.4.1.3.

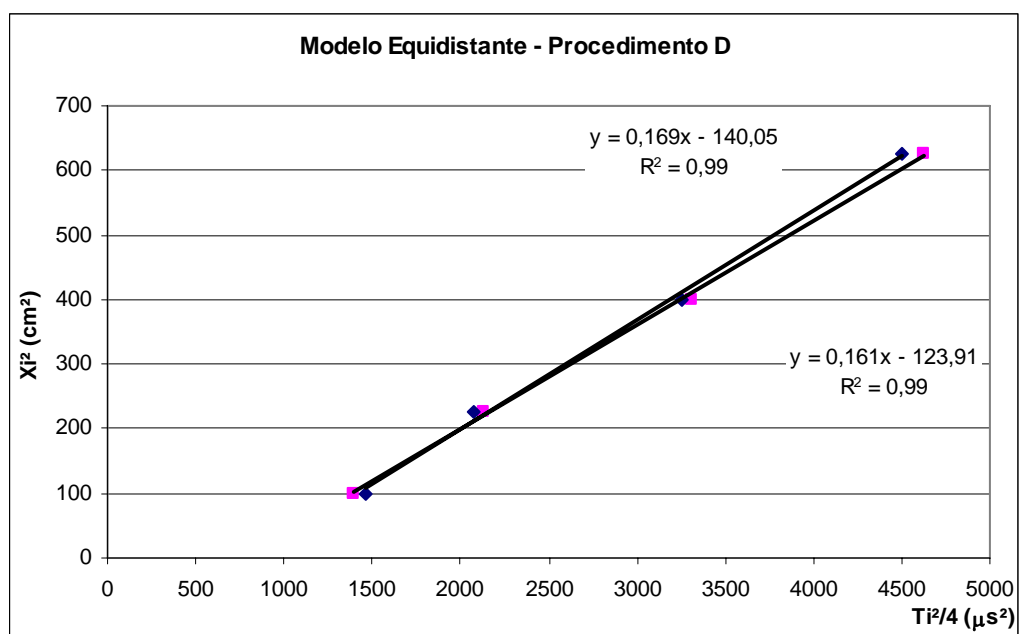


Figura 5.28 – Curva Modelo Equidistante - Procedimento D - Amostra 4.

A Tabela 5.24 apresenta a estimativa de h e de V a partir do coeficiente angular e a intersecção da expressão linear apresentado na Figura 5.28.

Tabela 5.24 – Estimativa de “h” para modelo eqüidistante.

Procedimento D			
	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	140,050	123,910	
$h(\text{cm})$	11,834	11,131	11,5
V^2	0,169	0,161	
$V(\text{m/s})$	4113	4014	4064

- Modelo Linear (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

As Figuras 5.29 e 5.30 apresentam os gráficos obtidos pelo modelo linear conforme apresentado no item 3.4.1.3.

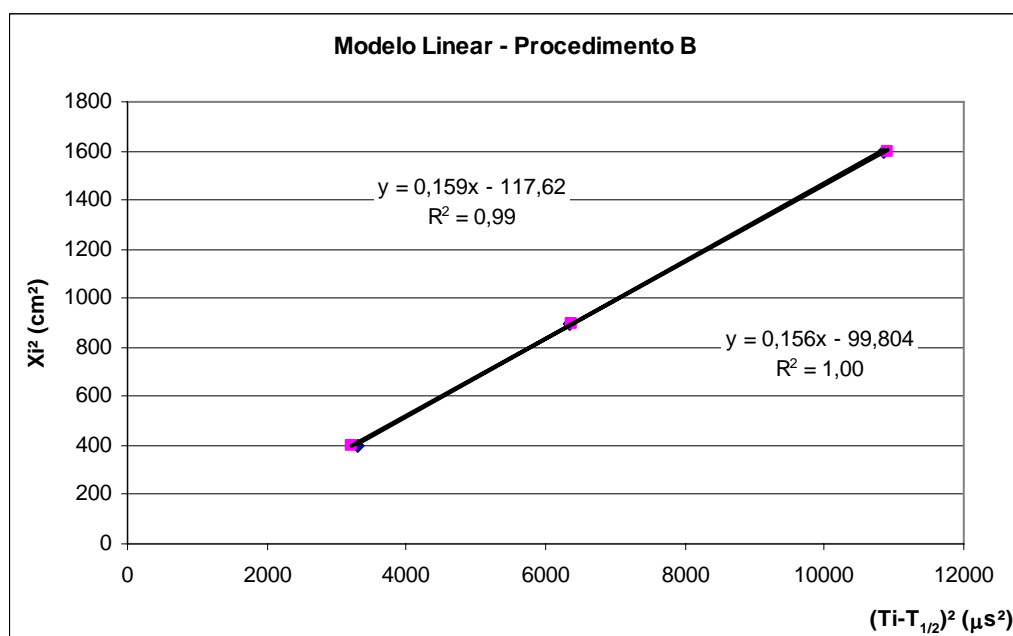


Figura 5.29 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 4.

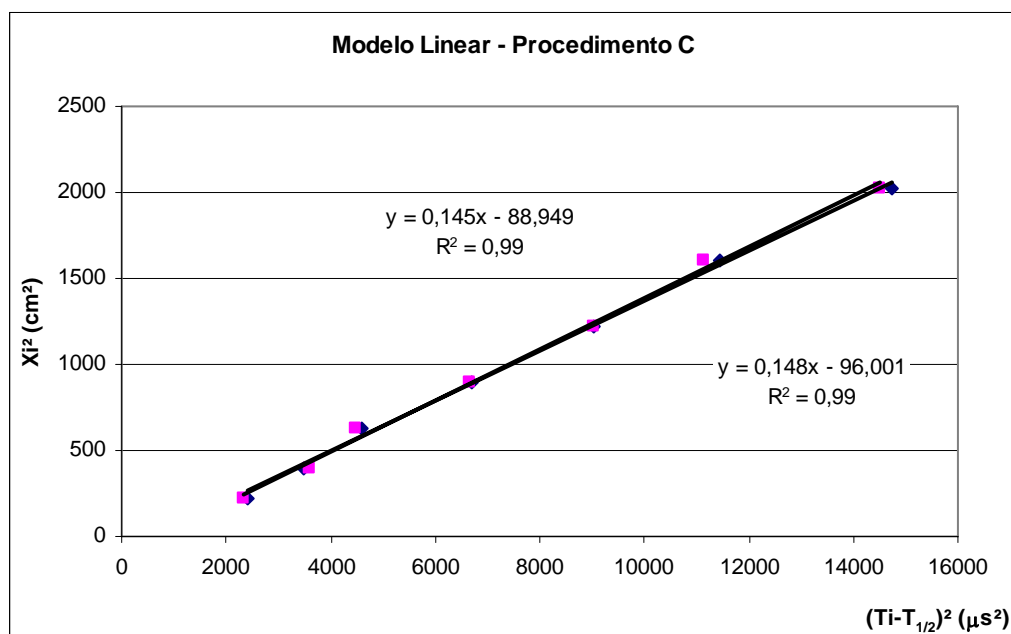


Figura 5.30 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 4.

A Tabela 5.25 apresenta a estimativa de h e de V a partir dos coeficientes angulares e a intersecção das expressões lineares apresentados nas Figuras 5.29 e 5.30.

Tabela 5.25 – Obtenção da estimativa de “ h ” pelo modelo linear.

	Procedimento B			Procedimento C		
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	117,620	99,804		88,949	96,001	
$h(\text{cm})$	10,845	9,990	10,4	9,431	9,798	9,6
V^2	0,159	0,156		0,145	0,149	
$V(\text{m/s})$	3984	3951	3967	3813	3854	3833

5.1.3 Análise dos resultados das fendas perpendiculares

Para análise de qual modelo ou procedimento seria mais indicado para estimativa da profundidade “ h ” buscou-se elaborar gráficos que pudessem ilustrar com maior facilidade um comparativo entre os mesmos.

5.1.3.1 Comparativo entre Velocidades

A Tabela 5.26 apresenta um resumo das velocidades obtidas em cada amostra conforme o modelo utilizado.

Tabela 5.26 – Resumo das velocidades obtidas com o ultra-som.

Amostras	Indireto	Linear (5/5)	Linear (10/10)	Linear (10/10 _{5/5})	Eqüidistante
		Procedimento A	Procedimento B	Procedimento C	Procedimento D
1 (h=2,50 cm)	3844	3837	3868	3962	3831
2 (h=5,00 cm)	3655	3710	3634	3860	3709
3 (h=7,50 cm)	3481	-	3886	3941	3707
4 (h=10,0 cm)	3772	-	3967	3833	4064

Comparando-se os valores de velocidade no modelo de transmissão indireta, utilizado no modelo 1, verifica-se que estes são menores que os valores estimados pelos modelos lineares e eqüidistantes, confirmando a hipótese que a velocidade da onda obtida pelo método indireto na superfície da amostra apresenta valores mais baixos em relação à velocidade do meio da amostra.

5.1.3.2 Comparativo Procedimento D

Para o procedimento D foram utilizados três modelos para estimar a profundidade “h” das amostras. A Figura 5.31 apresenta um gráfico juntando estes modelos.

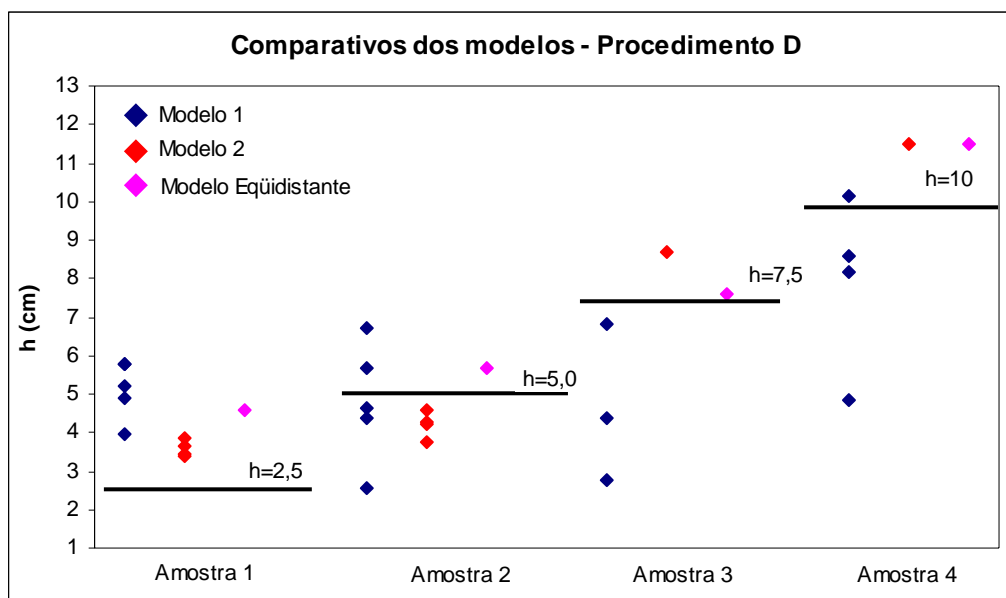


Figura 5.31 – Procedimento D – Comparativo entre Modelo 1, Modelo 2 e Modelo Eqüidistante.

No modelo 1, a média das profundidades obtidas fica próxima das estimativas pelos outros modelos, porém este modelo apresentou um coeficiente de variação elevado, significando que é necessário um grande número de leituras para que a média se torne mais confiável.

É possível perceber na Figura 5.31 que o modelo 2 e o modelo eqüidistante são os que melhor se aproximaram da profundidade real, fato este que pode estar relacionado à incorporação da velocidade de propagação ao longo da trajetória pela fenda pelos modelos em contraposição à utilização de um valor arbitrário de V obtido em outra região da peça, como utilizado no modelo 1.

Para aberturas com profundidade de 2,5 cm não foi possível efetivar uma estimativa adequada com nenhum dos modelos, fato já tinha sido constatado na pesquisa de Medeiros (2007). O ultrassom, aparentemente não apresenta uma boa resposta para fendas superficiais com pequena profundidade.

5.1.3.3 Comparativo entre Modelos Linear e Eqüidistante

Os modelos lineares e eqüidistantes aproximam os valores de propagação da onda em uma só curva, onde obtém-se somente um valor de “ h ”. A Figura 5.32 apresenta um comparativo entre o modelos lineares (5/5) e (10/10) e o modelo eqüidistante.

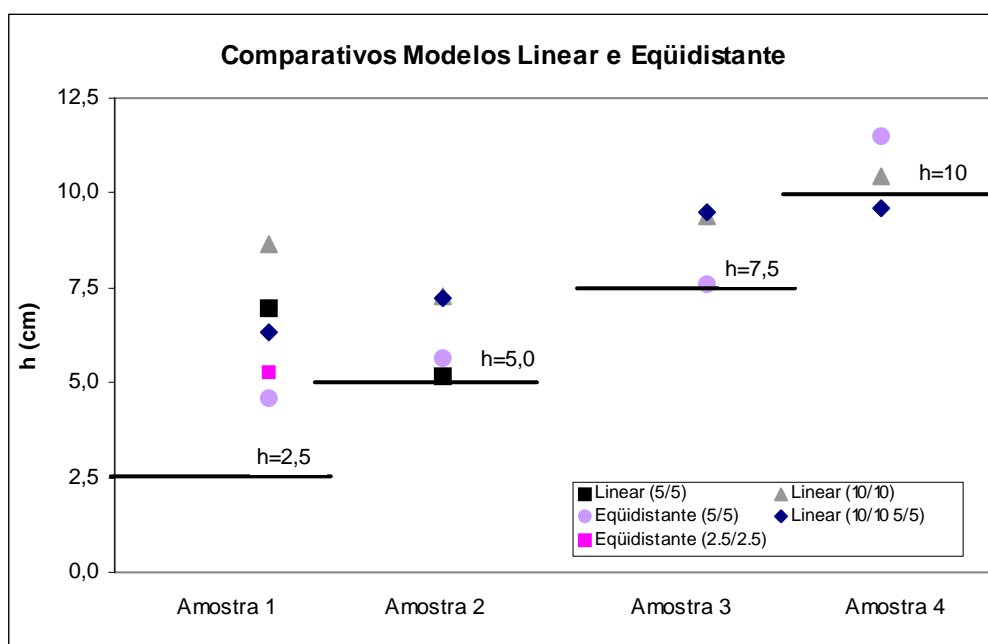


Figura 5.32 – Comparativo entre Modelo Linear (5/5), Modelo Linear (10/10) e Modelo Eqüidistante.

A Tabela 5.27 apresenta um resumo das profundidades estimadas com o modelo linear e equidistante.

Tabela 5.27 – Resumo das profundidades das fendas estimadas pelo modelo linear e equidistante.

h real (cm)	Linear (5/5)		Linear (10/10)		Linear (10/10 _{5/5})		Equidistante (5/5)		Equidistante (2,5/2,5)	
	h estimado (cm)	Erro (%)	h estimado (cm)	Erro (%)	h estimado (cm)	Erro (%)	h estimado (cm)	Erro (%)	h estimado (cm)	Erro (%)
2,50	6,96	178%	8,64	245%	6,31	152%	4,60	84%	5,27	111%
5,00	5,15	3%	7,26	45%	7,23	45%	5,65	13%	-	
7,50	-		9,40	25%	9,51	27%	7,59	1%	-	
10,00	-		10,42	4%	9,61	4%	11,48	15%	-	

Analisando a Figura 5.32 e a Tabela 5.27 pode-se avaliar que o modelo equidistante 5/5 apresenta uma boa resposta na estimativa da profundidade de fendas, para as fendas acima de 5 cm.

A única profundidade que não pode ser estimada foi a de 2,5 cm, devido ser muito superficial e o ultra-som não apresenta uma boa resposta para fendas superficiais conforme descrito anteriormente. Com isto foi estabelecido o procedimento E, que considera o transmissor e receptor variando equidistantes de 2,5 em 2,5 cm da fenda, contudo ainda não foi possível uma boa estimativa, confirmando que o ultra-som não consegue detectar fendas superficiais com pequena profundidade.

5.1.4 Estimativa da Profundidade de Fendas Inclinadas

Ainda não existem modelos matemáticos para avaliação das profundidades de fendas inclinadas. Com isto, foram utilizados os mesmos modelos adotados para as fendas verticias. Os procedimentos descritos no item 4.4.1.1 foram aplicados nas amostras 5 a 7 para avaliação das profundidades das fendas inclinadas. Os procedimentos B, C e D foram realizados em todas as 3 amostras. Para o procedimento de leitura com os dois transdutores movendo-se em ambas as faces (procedimento D), avaliou-se h a partir dos modelos matemáticos de Bungey (modelo 1), da BS (modelo 2) e o modelo equidistante proposto por Pinto, Medeiros e Padaratz, descritos no item 3.4.1.2. Para os procedimentos de leitura em que o transdutor-transmissor era fixo,

movendo-se o transdutor-receptor (Procedimentos B e C) utilizou-se o modelo linear proposto por Pinto, Medeiros e Padaratz para avaliação de h .

5.1.4.1 Amostra 5 - Fenda de $h = 7,5$ cm

A Tabela 5.28 apresenta os valores obtidos nas leituras para os procedimentos B e C.

Tabela 5.28 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento B e C – Amostra 5.

Receptor (cm)	Procedimento B Transmissor 10 cm		Procedimento C Transmissor 10 cm	
	Leitura 1 (μ s)	Leitura 2 (μ s)	Leitura 1 (μ s)	Leitura 2 (μ s)
10	74,7	74,2	69,6	68,9
15	-	-	79	78
20	94,8	93,8	88	89
25	-	-	99,1	99,9
30	117	117	112,6	112,7
35	-	-	122	123,5
40	141,5	141,5	136	137,5
45	-	-	148,6	149,4

A Tabela 5.29 apresenta os valores obtidos nas leituras para o procedimento D.

Tabela 5.29 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D – Amostra 5.

Transmissor - Receptor (cm)	Procedimento D	
	Leitura 1 (μ s)	Leitura 2 (μ s)
10-10	71,5	72,5
15-15	94,1	96,4
20-20	113,5	117
25-25	141,5	142

- Modelo 1 (Bungey, 1989)

Neste modelo de Bungey utilizou-se a velocidade obtida pelo método indireto apresentado na Tabela 5.1, com o valor de 3.900 m/s. A Tabela 5.30 apresenta os resultados da estimativa dos h obtidos.

Tabela 5.30 – Estimativa de “h” para modelo 1.

Vc (m/s)	Transmissor - Receptor	Procedimento D		
		h ₁	h ₂	h _m (cm)
3.900	10-10	9,7	10,0	9,9
	15-15	10,6	11,3	10,9
	20-20	9,5	11,0	10,2
	25-25	11,7	11,9	11,8
Média		10,7		
Coeficiente de Variação		7,9%		

- Modelo 2 (BS, 1986)

A Tabela 5.31 apresenta a estimativa de h pelo modelo 2 para as combinações de leituras apresentadas.

Tabela 5.31 – Estimativa de “h” para modelo 2.

Combinação		Procedimento D		
Transmissor - Receptor	Transmissor - Receptor	h ₁	h ₂	h _m (cm)
10-10	20-20	9,9	9,3	9,6
Média		9,6		
Coeficiente de Variação		-		

- Modelo Eqüidistante (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

A Figura 5.33 apresenta o gráfico obtido pelo modelo eqüidistante conforme apresentado no item 3.4.1.3.

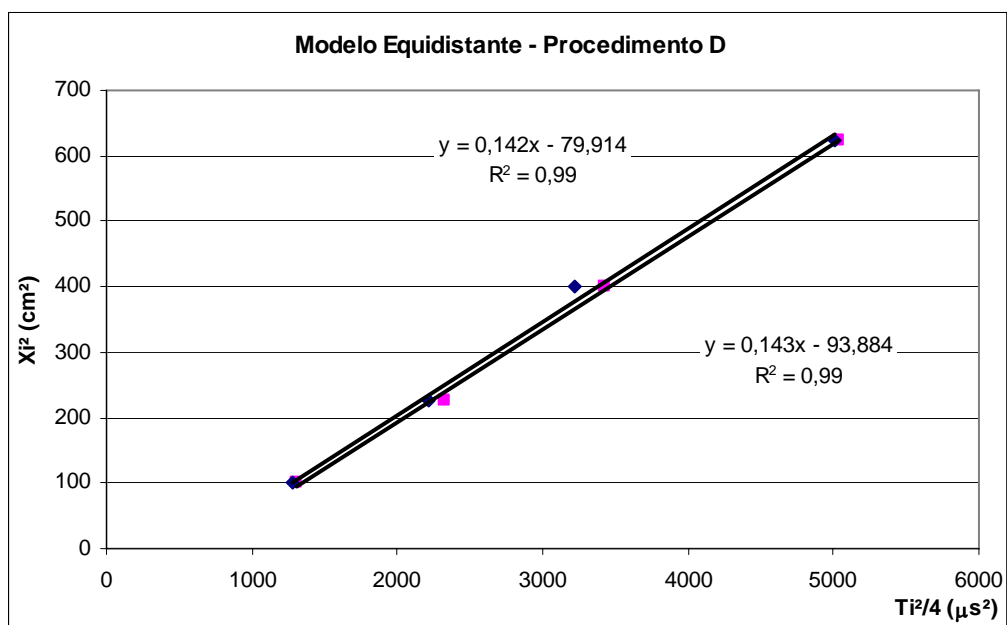


Figura 5.33 – Curva Modelo Equidistante - Procedimento D - Amostra 5.

A Tabela 5.32 apresenta a estimativa de h e de V a partir do coeficiente angular e a intersecção da expressão linear apresentado na Figura 5.33.

Tabela 5.32 – Estimativa de “h” para modelo equidistante.

	Procedimento D		
	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	79,914	93,884	
$h(cm)$	8,939	9,689	9,3
V^2	0,143	0,143	
$V(m/s)$	3775	3776	3776

- Modelo Linear (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

As Figuras 5.34 e 5.35 apresentam os gráficos obtidos pelo modelo linear conforme apresentado no item 3.4.1.3.

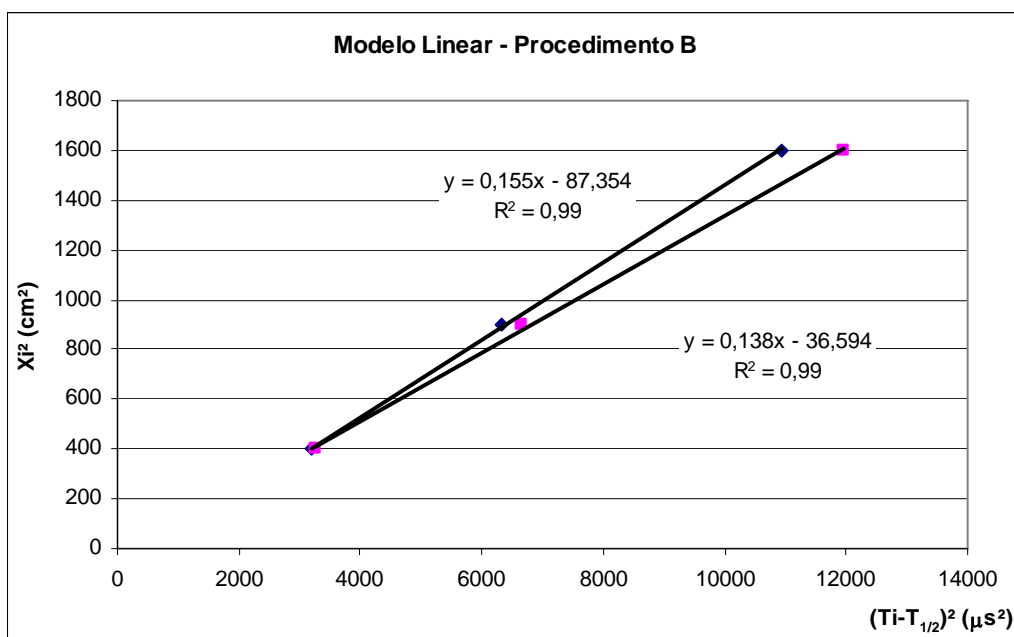


Figura 5.34 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 5.

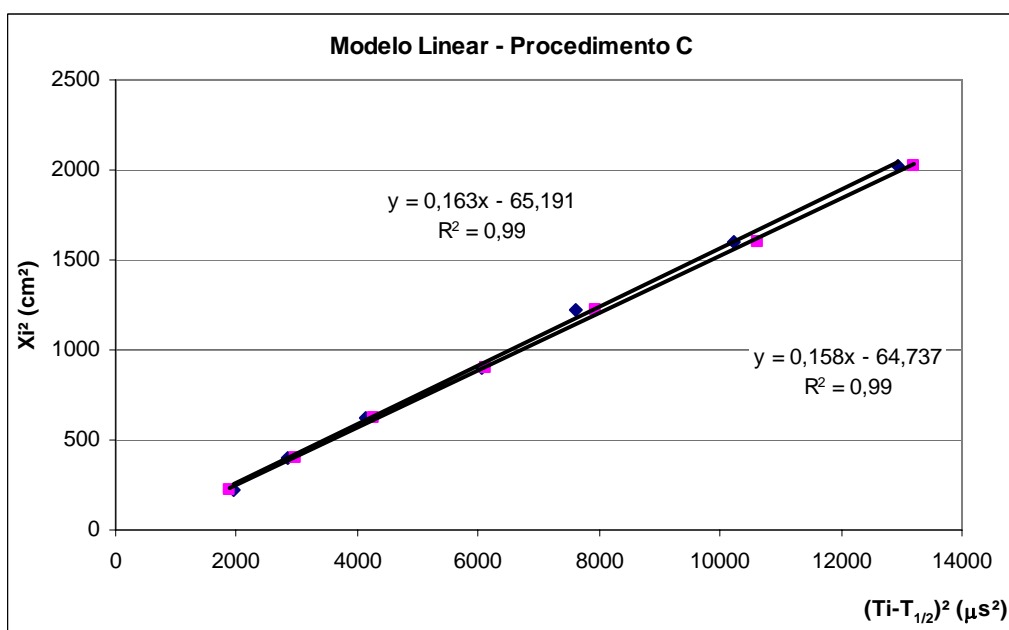


Figura 5.35 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 5.

A Tabela 5.33 apresenta a estimativa de h e de V a partir dos coeficientes angulares e a intersecção das expressões lineares, apresentados nas Figuras 5.34 e 5.35.

Tabela 5.33 – Obtenção da estimativa de “h” pelo modelo linear.

	Procedimento B			Procedimento C		
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	87,354	36,594		65,191	64,737	
$h(\text{cm})$	9,346	6,049	7,7	8,074	8,046	8,1
V^2	0,159	0,138		0,163	0,158	
$V(\text{m/s})$	3984	3711	3847	4036	3980	4008

5.1.4.2 Amostra 6 - Fenda de $h = 6,2 \text{ cm}$

A Tabela 5.34 apresenta os valores obtidos nas leituras para os procedimentos B e C.

Tabela 5.34 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento B e C – Amostra 6.

Receptor (cm)	Procedimento B Transmissor 10 cm		Procedimento C Transmissor 10 cm	
	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)
10	69	74	71	72
15	-	-	78,3	79,4
20	90	92,5	87,3	89,3
25	-	-	99,8	101,2
30	116	118	111	112,1
35	-	-	122,1	125,5
40	142,2	143,6	135	137
45	-	-	149	151

A Tabela 5.35 apresenta os valores obtidos nas leituras para o procedimento D.

Tabela 5.35 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D – Amostra 6.

Transmissor – Receptor (cm)	Procedimento D	
	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)
10-10	73,4	72,7
15-15	92,3	91,8
20-20	112,5	114,3
25-25	142,3	143,1

- Modelo 1 (Bungey, 1989)

Neste modelo de Bungey utilizou-se a velocidade obtida pelo método indireto apresentado na Tabela 5.1, com o valor de 3.758 m/s. A Tabela 5.36 apresenta os resultados da estimativa dos h obtidos.

Tabela 5.36 – Estimativa de “h” para modelo 1.

Vc (m/s)	Transmissor - Receptor	Procedimento D		
		h ₁	h ₂	h _m (cm)
3.807	10-10	9,5	9,3	9,4
	15-15	8,7	8,5	8,6
	20-20	6,8	7,8	7,3
	25-25	9,5	9,9	9,7
Média		8,8		
Coeficiente de Variação		12%		

- Modelo 2 (BS, 1986)

A Tabela 5.37 apresenta a estimativa de h pelo modelo 2 para as combinações de leituras apresentadas.

Tabela 5.37 – Estimativa de “h” para modelo 2.

Combinação		Procedimento D		
Transmissor - Receptor	Transmissor - Receptor	h ₁	h ₂	h _m (cm)
10-10	20-20	11,1	10,2	10,6
Média		10,6		
Coeficiente de Variação		-		

- Modelo Equidistante (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

A Figura 5.36 apresenta o gráfico obtido pelo modelo equidistante conforme apresentado no item 3.4.1.3.

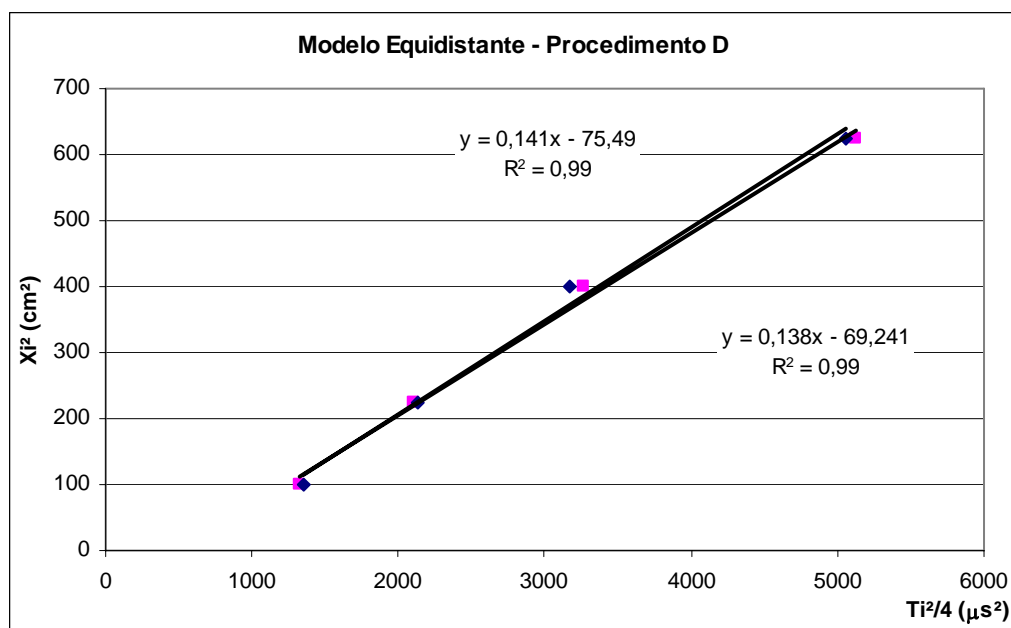


Figura 5.36 – Curva Modelo Equidistante - Procedimento D - Amostra 6.

A Tabela 5.38 apresenta a estimativa de h e de V a partir do coeficiente angular e a intersecção da expressão linear apresentada na Figura 5.36.

Tabela 5.38 – Estimativa de “h” para modelo equidistante.

	Procedimento D		
	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	75,490	69,241	
$h(cm)$	8,688	8,321	8,5
V^2	0,141	0,138	
$V(m/s)$	3758	3711	3734

- Modelo Linear (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

As Figuras 5.37 e 5.38 apresentam os gráficos obtidos pelo modelo linear conforme apresentado no item 3.4.1.3.

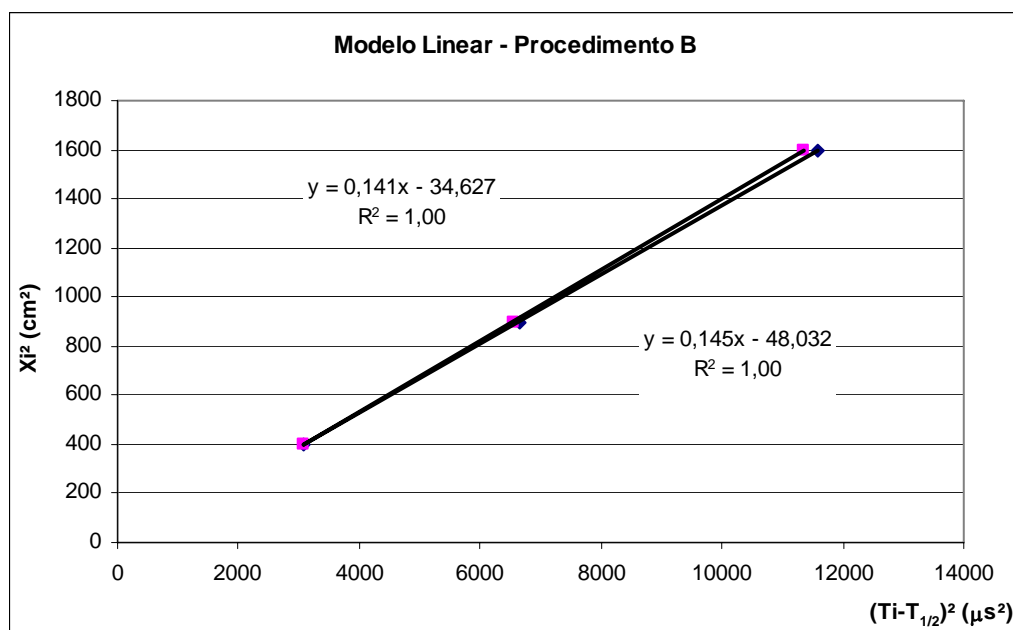


Figura 5.37 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 6.

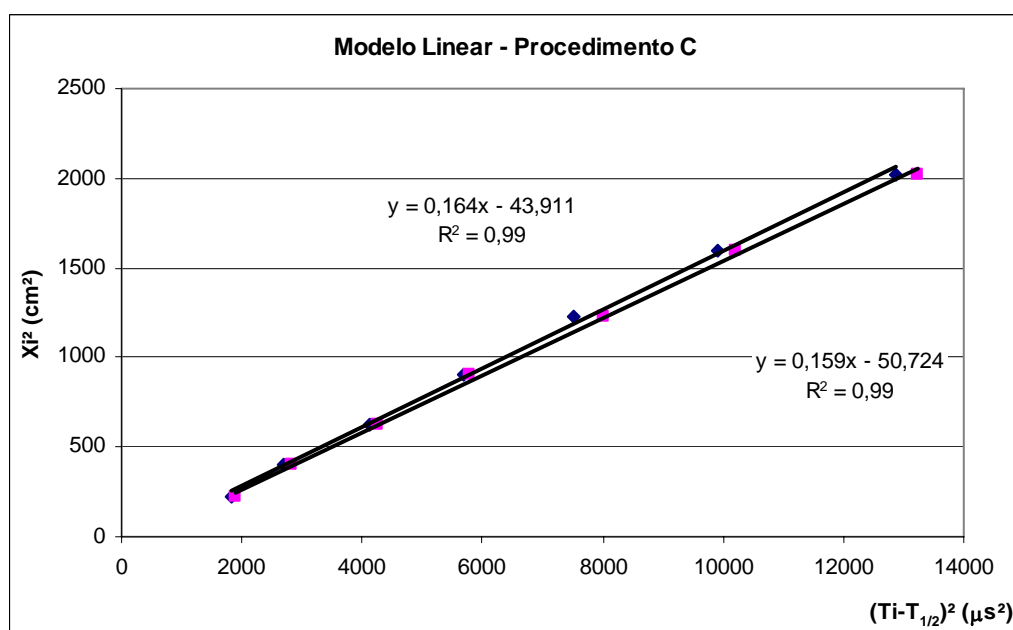


Figura 5.38 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 6.

A Tabela 5.39 apresenta a estimativa de h e de V a partir dos coeficientes angulares e a intersecção das expressões lineares apresentados nas Figuras 5.37 e 5.38.

Tabela 5.39 – Obtenção da estimativa de “h” pelo modelo linear.

	Procedimento B			Procedimento C		
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	34,627	48,032		43,911	50,724	
$h(\text{cm})$	5,884	6,931	6,4	6,627	7,122	6,9
V^2	0,141	0,145		0,164	0,159	
$V(\text{m/s})$	3756	3801	3779	4046	3990	4018

5.1.4.3 Amostra 7 - Fenda de $h = 8,5 \text{ cm}$

A Tabela 5.40 apresenta os valores obtidos nas leituras para os procedimentos B e C.

Tabela 5.40 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento B e C – Amostra 7.

Receptor (cm)	Procedimento B Transmissor 10 cm		Procedimento C Transmissor 10 cm	
	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)
10	99,2	99,5	75,6	74,7
15	-	-	79,9	81
20	98,6	99	89,6	90,8
25	-	-	98,6	98,1
30	122,4	125	111	112,9
35	-	-	123,3	125,4
40	143,5	145	133,8	135,5
45	-	-	147,1	148,2

A Tabela 5.41 apresenta os valores obtidos nas leituras para o procedimento D.

Tabela 5.41 – Leitura do tempo de propagação da onda obtida pelo procedimento D – Amostra 7.

Transmissor – Receptor (cm)	Procedimento D	
	Leitura 1 (μs)	Leitura 2 (μs)
15-15	94,5	95,5
20-20	118,3	120,5
25-25	143,2	143,5

- Modelo 1 (Bungey, 1989)

Neste modelo de Bungey (modelo 1) utilizou-se a velocidade obtida pelo método indireto apresentado na Tabela 5.1, com o valor de 3.834 m/s. A Tabela 5.42 apresenta os resultados da estimativa de h obtidos.

Tabela 5.42 – Estimativa de “h” para modelo 1.

Vc (m/s)	Transmissor - Receptor	Procedimento D		
		h ₁	h ₂	h _m (cm)
3.834	15-15	10,2	10,5	10,3
	20-20	10,7	11,6	11,1
	25-25	11,3	11,5	11,4
Média		10,9		
Coeficiente de Variação		5,1%		

- Modelo 2 (BS, 1986)

A Tabela 5.43 apresenta a estimativa de h pelo modelo 2 para as combinações de leituras apresentadas. Nesta amostra não se pode utilizar combinações múltiplas conforme estabelecido no modelo proposto pela BS 1881: Part 203 (1986), discutido no item 3.4.1.3. Porém foi realizada uma variação do procedimento estabelecido na norma, e realizou-se uma combinação entre 15-25 cm de distância.

Tabela 5.43 – Estimativa de “h” para modelo 2.

Combinação		Procedimento D		
Transmissor - Receptor	Transmissor - Receptor	h ₁	h ₂	h _m (cm)
15-15	25-25	9,1	9,6	9,4
Média		9,4		
Coeficiente de Variação		-		

- Modelo Equidistante (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

A Figura 5.39 apresenta o gráfico obtido pelo modelo equidistante conforme apresentado no item 3.4.1.3.

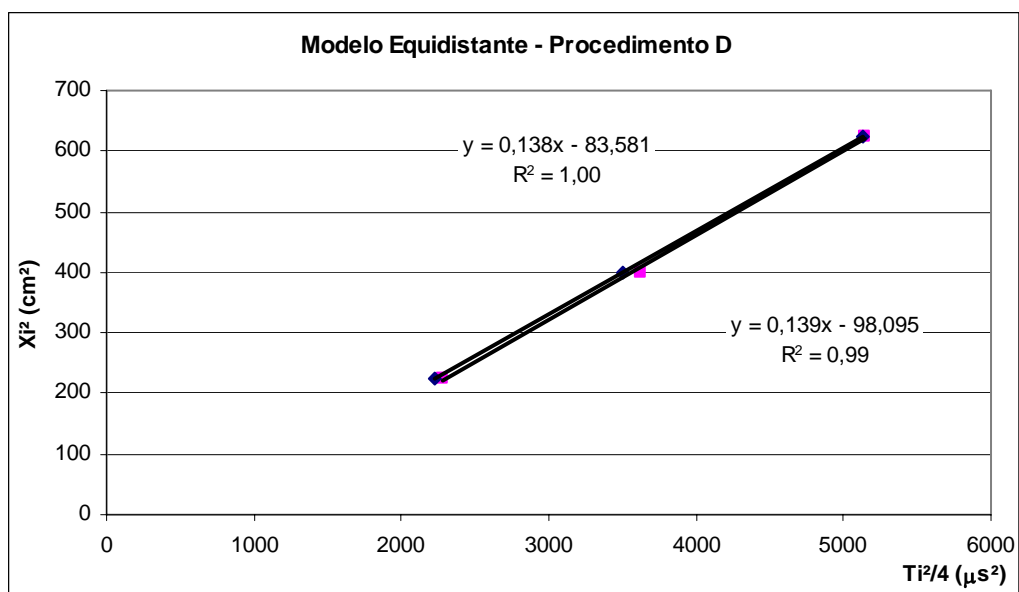


Figura 5.39 – Curva Modelo Equidistante - Procedimento D - Amostra 7.

A Tabela 5.44 apresenta a estimativa de h e de V a partir do coeficiente angular e a intersecção da expressão linear apresentado na Figura 5.39.

Tabela 5.44 – Estimativa de “h” para modelo equidistante.

	Procedimento D		
	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	83,581	98,095	
h (cm)	9,142	9,904	9,5
V^2	0,138	0,140	
V (m/s)	3718	3738	3728

- Modelo Linear (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)

As Figuras 5.40 e 5.41 apresentam os gráficos obtidos pelo modelo linear, conforme apresentado no item 3.4.1.3.

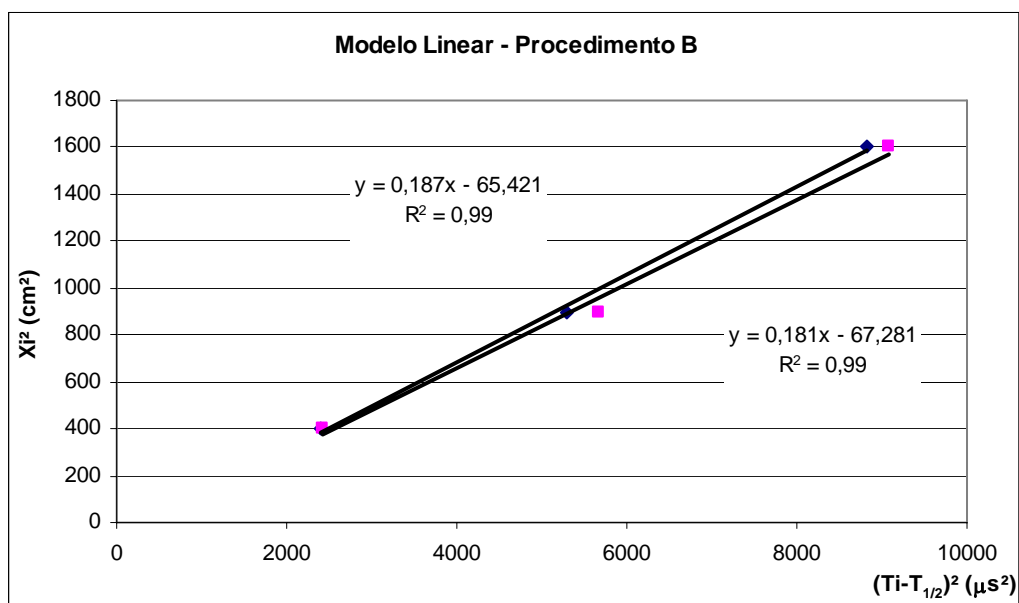


Figura 5.40 – Curva Modelo Linear - Procedimento B - Amostra 7.

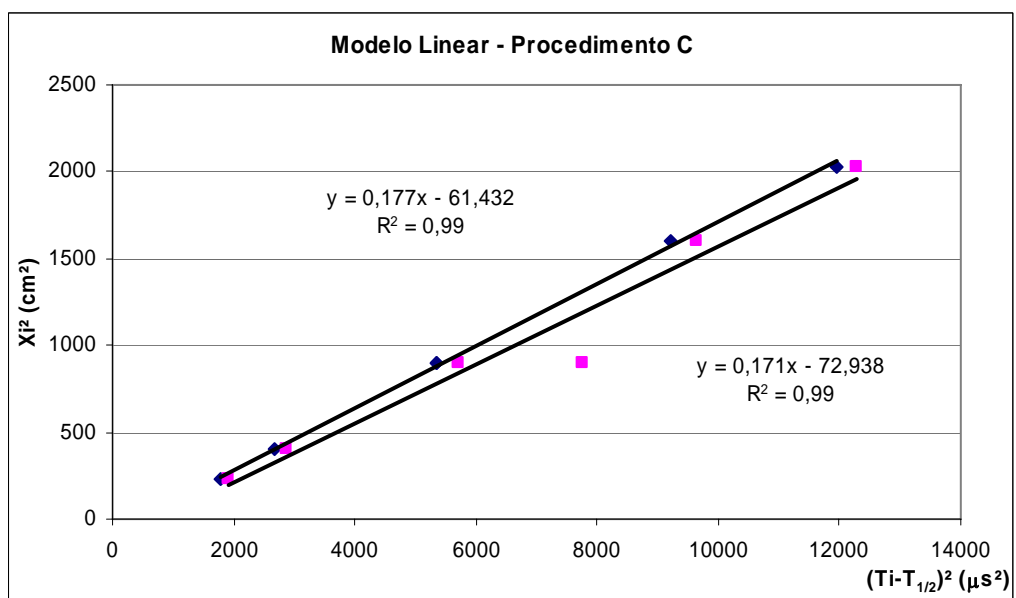


Figura 5.41 – Curva Modelo Linear - Procedimento C - Amostra 7.

A Tabela 5.45 apresenta a estimativa de h e de V a partir dos coeficientes angulares e a intersecção das expressões lineares apresentados nas Figuras 5.40 e 5.41.

Tabela 5.45 – Obtenção da estimativa de “h” pelo modelo linear.

	Procedimento B			Procedimento C		
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Leitura 1	Leitura 2	Média
h^2	65,421	67,281		61,432	72,938	
h(cm)	8,088	8,202	8,1	7,838	8,540	8,2
V^2	0,187	0,181		0,177	0,171	
V(m/s)	4329	4252	4291	4207	4139	4173

5.1.5 Análise dos resultados das fendas inclinadas

5.1.5.1 Comparativo entre Velocidades

A Tabela 5.46 apresenta um resumo das velocidades obtidas em cada amostra conforme o modelo utilizado.

Tabela 5.46 – Resumo das velocidades obtidas com o ultra-som.

Amostras	Indireto	Procedimento B	Procedimento C	Procedimento D
		Linear (10/10)	Linear (10/10 _{s/s})	Eqüidistante
5 (h=7,5 cm)	3900	3847	4008	3776
6 (h=6,2 cm)	3758	3779	4018	3734
7 (h=8,5 cm)	3834	4291	4173	3728

Nas fendas inclinadas não se obteve uma velocidade menor pelo método de transmissão indireto, o modelo eqüidistante forneceu a menor velocidade de propagação da onda. Como foram utilizados os modelos matemáticos das fendas verticais para as fendas inclinadas não se pode afirmar que as velocidade pelos modelos linear e eqüidistante são as velocidades reais ao longo da trajetória envolvendo a abertura.

5.1.5.2 Comparativo Procedimento D

No procedimento D têm-se três modelos para estimar a profundidade “h”. A Figura 5.42 apresenta um gráfico juntando estes modelos.

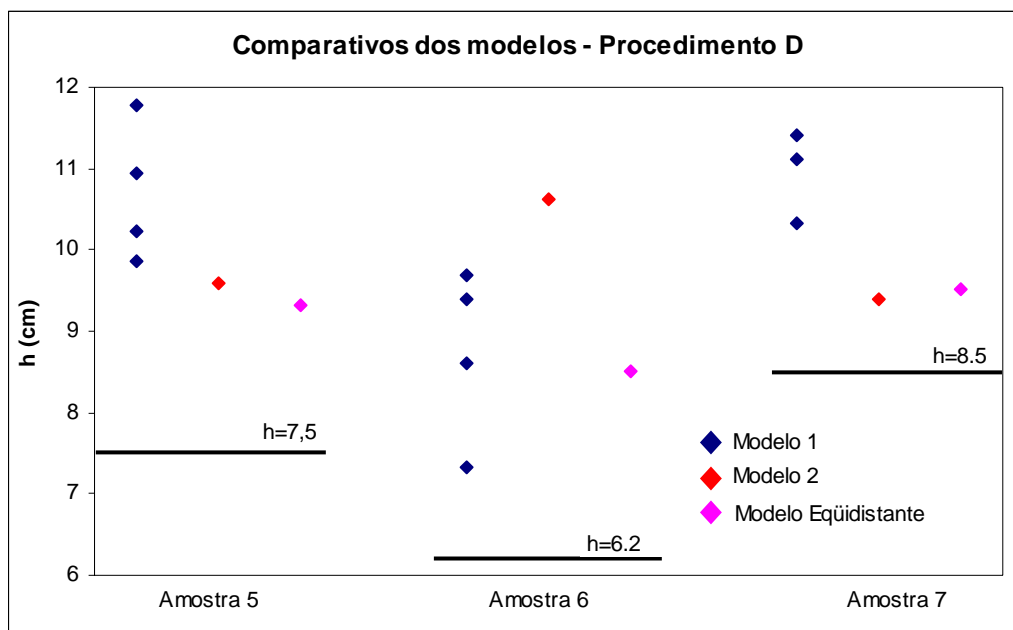


Figura 5.42 – Procedimento C – Comparativo entre Modelo 1, Modelo 2 e Modelo Equidistante.

O modelo equidistante é que apresenta resultados mais próximos dos valores reais, já o modelo 2 não forneceu uma boa estimativa para amostra 6. No modelo 1, assim como para as fendas verticais, apresentou um coeficiente de variação elevado.

5.1.5.3 Comparativo entre Modelos Linear e Equidistante

A Figura 5.43 apresenta um comparativo entre o modelo linear (10/10), Linear (10/10 de 5/5) e o modelo equidistante.

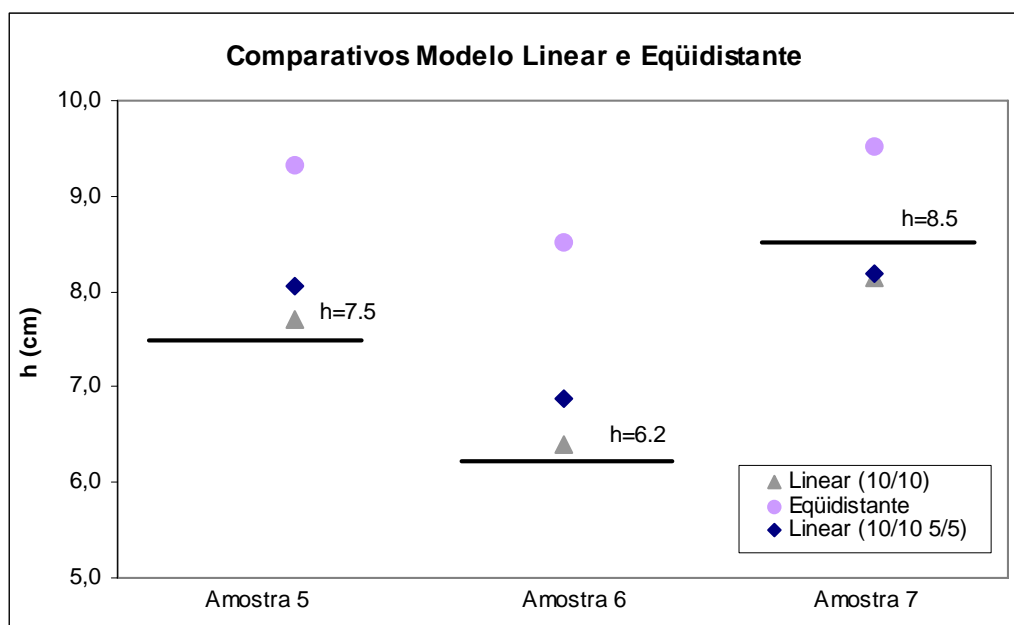


Figura 5.43 – Comparativo entre Modelo Linear Linear (10/10) e Modelo Eqüidistante.

A Tabela 5.47 apresenta um resumo das profundidades estimadas com o modelo linear e eqüidistante.

Tabela 5.47 – Resumo das profundidades das fendas estimadas pelo modelo linear e eqüidistante.

h real (cm)	Linear (10/10)		Linear (10/10 _{5/5})		Eqüidistante (5/5)	
	h estimado (cm)	Erro (%)	h estimado (cm)	Erro (%)	h estimado (cm)	Erro (%)
7,50	7,70	3%	8,06	7%	9,31	24%
6,20	6,41	3%	6,87	11%	8,50	37%
8,50	8,15	4%	8,19	4%	9,52	12%

Analisando a Figura 5.42 e a Tabela 5.47 pode-se avaliar que os modelos lineares apresentaram um erro menor em relação a estimativa das profundidades das fendas verticais, aparentemente o linear 10/10, porém o linear 10/10 _{5/5} apresenta um maior número de leituras, tornando-se mais confiável

5.2 UTILIZAÇÃO DO ECO-IMPACTO

A utilização do Eco-impacto para detecção da profundidade das fendas buscou avaliar a eficácia deste equipamento na obtenção de leituras confiáveis, e uma possível influência do operador nas mesmas.

5.2.1 Resultados dos testes experimentais

Conforme descrito no item 4.4.2.1 foram testadas esferas de aço e distâncias X na amostra 4, com profundidade real de 10 cm, para definição dos parâmetros a serem adotados nos ensaios com a utilização do eco-impacto.

Com a utilização da esfera de 5 mm não foi possível a estimativa de h, pois não se pode obter as formas de ondas esperadas. Já a esfera de 6,5 mm, utilizado para o impacto, obteve formas de ondas esperadas, porém exige um grande número de ensaios para obtenção das mesmas. As esferas de 8 a 12,5 mm apresentaram médias parecidas e formas de ondas de acordo com o esperado. No Anexo C estão apresentados os resultados com estas esferas de aço e a Tabela 5.48 apresenta um resumo das profundidades estimadas com as diferentes esferas de aço.

Tabela 5.48 – Resumo das profundidades obtidas com variação das esferas de aço para amostra 4 (h = 10 cm).

Esfera de aço (mm)	Profundidade média estimada (cm)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
6,5	10,25	0,81	7,9%
8	10,23	0,51	4,9%
9,5	9,93	0,52	5,2%
11	10,05	0,53	5,3%
12,5	10,11	0,46	4,6%

As distâncias utilizadas para os transdutores e para o impacto não influenciaram os resultados obtidos, porém distâncias muito pequenas ou distâncias muito grandes são incômodas na realização dos ensaios para os operadores. Foi adotada para todos os ensaios a distância X de 7,5 cm devido à maior facilidade na operação. Apesar de Sansalone (1997) sugerir que a distância do transdutor 2 para a abertura deveria estar entre 0,03 a 0,05 m, obteve-se bons resultados com a distância adotada de 7,5 cm.

No Anexo D estão apresentados os resultados com estas distâncias X e a Tabela 5.49 apresenta um resumo das profundidades obtidas com as distâncias.

Tabela 5.49 – Resumo das profundidades obtidas com variação das distâncias X para amostra 4.

Distâncias X (cm)	Profundidade média estimada (cm)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
5	10,1	0,53	5,3%
7,5	10,3	0,51	5,0%
10	10,6	0,84	7,9%

Conforme descrito acima todos os ensaios foram realizados na estimativa da profundidade das fendas com impactador de 11 mm (esfera de aço) com distâncias iguais dos transdutores e do impacto de 7,5 cm.

5.2.2 Velocidade de propagação pelo modo de transmissão indireta

Para obtenção da leituras foram usados os transdutores fixos a 30 cm e produzido o impacto com a esfera de aço acoplada de 3,9 mm ao transdutor.

Como descrito no item 3.5.2.1, a obtenção das velocidades da onda é de fácil interpretação, porém os transdutores tem que estar bem acoplados para que a leitura seja realizada.



Figura 5.44 – Realização da leitura com Eco-Impacto – Obtenção velocidade.

A Figura 5.45 apresenta a leitura dos transdutores A e B para a amostra 5. Gráficos similares foram obtidos para cada amostra. A velocidade é calculada dividindo-se a distância entre os transdutores de 30 cm pelo tempo de propagação entre os dois transdutores, obtida pela movimentação vertical das duas ondas, conforme assinalado na figura.

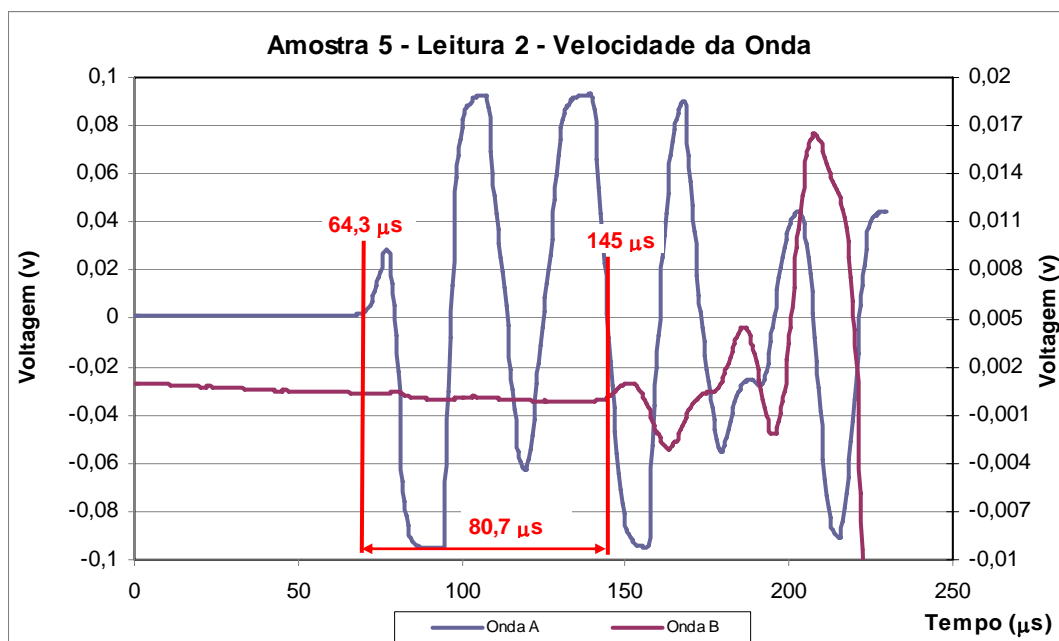


Figura 5.45 – Gráfico obtido das ondas com Eco-Impacto – Obtenção velocidade.

Através do gráfico obtém-se um tempo de propagação entre os dois transdutores de 80,7 μs . Para se obter a velocidade de propagação da onda basta dividir a distância de 30 cm entre os dois transdutores por 80,7 μs , conforme Eq. 3.21, fornecendo $V = 3.717 \text{ m/s}$.

A seguir é apresentada a tabela resumo das velocidades das ondas obtidas com o eco-impacto, com os transdutores fixos a 30 cm.

Tabela 5.50 – Resumo das velocidades obtidas com os transdutores fixos a 30 cm.

Resumo das Velocidades			
Amostra	Leituras	Velocidade (m/s)	Média Velocidade (m/s)
1	1	3945	3850
	2	3765	
	3	3840	
2	1	3623	3693
	2	3765	
	3	3692	
3	1	3623	3772
	2	3692	
	3	4000	
4	1	3804	3866
	2	3914	
	3	3880	
5	1	3600	3685
	2	3717	
	3	3740	
6	1	3692	3724
	2	3789	
	3	3692	
7	1	3646	3694
	2	3646	
	3	3789	

Também foi realizado o procedimento B da ASTM C 1383 para obtenção da velocidade de propagação da onda. Não foi realizado o procedimento A da ASTM C 1383 devido ao tamanho da amostra não comportar as distâncias pré-estabelecidas neste item da norma.

A Figura 5.46 apresenta a realização da leitura com um transdutor e a esfera de aço.



Figura 5.46 – Realização da leitura com Eco-Impacto – Obtenção velocidade ASTM C 1383.

A Figura 5.47 apresenta a curva obtida de tempo x voltagem para a amostra 5 e a Figura 5.48 apresenta o espectro no domínio da frequência.

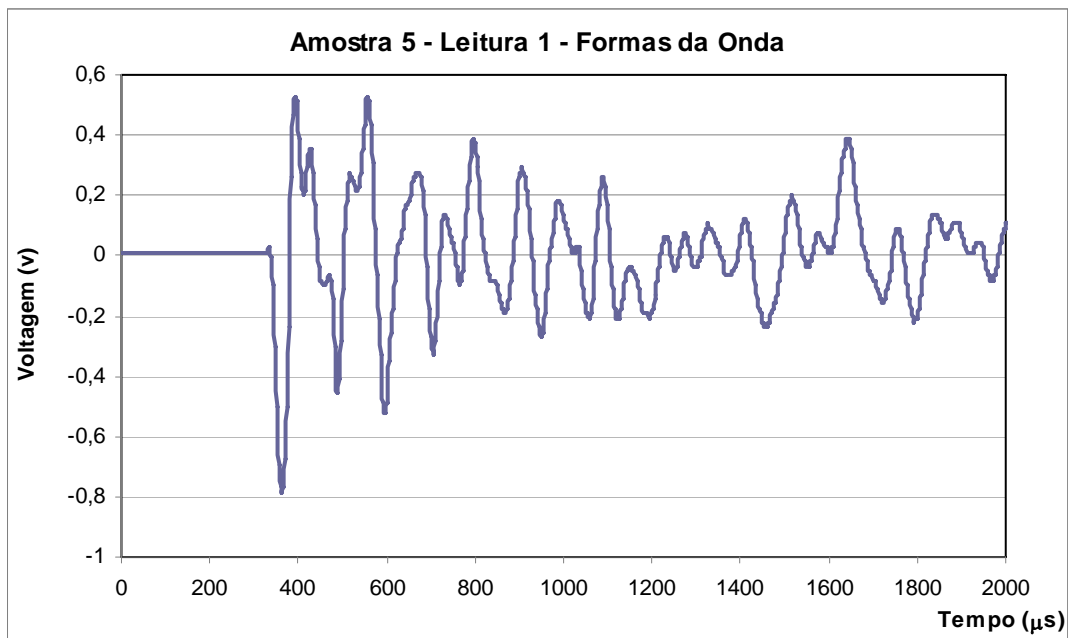


Figura 5.47 – Gráfico obtido das ondas com Eco-Impacto – Formas da onda.

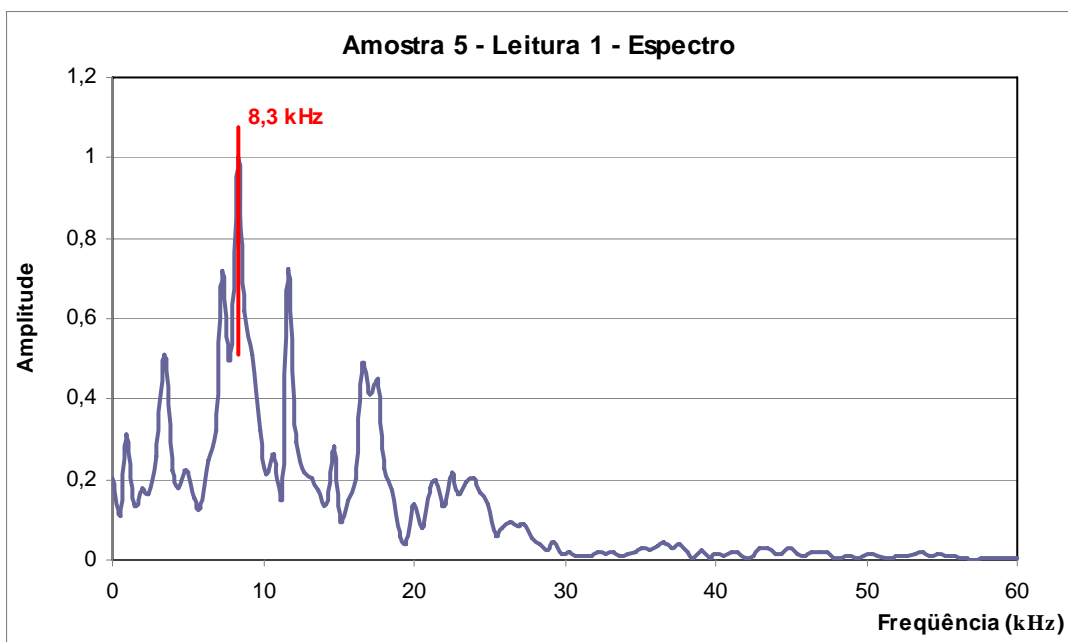


Figura 5.48 – Espectro depois da transformação das ondas para domínio da frequência.

Com o gráfico obtém-se a frequência fundamental da peça, neste caso 8,3 kHz. Para obter-se a velocidade de propagação da onda é necessário utilizar a relação entre frequência e velocidade,

$f_1 = \frac{\beta V_{pp}}{2T}$, conforme descrito no item 2.4.4. Como é conhecida a espessura da amostra ($T = 195$ mm) e β é uma relação entre a altura e largura da amostra, que neste caso é igual a 0,87, temos que $V_{pp} = \frac{f_1 \times 2T}{\beta}$ ou seja, $V_{pp} = 3.721$ m/s.

A seguir está apresentada a tabela resumo das velocidades das ondas obtidas com o eco-impacto com o procedimento B da ASTM C 1383.

Tabela 5.51 – Resumo das velocidades obtidas com procedimento B ASTM C 1383.

Resumo das Velocidades			
Amostra	Leituras	Velocidade	Média Velocidade
1	1	4007	3937
	2	4026	
	3	3778	
2	1	3985	3985
	2	4006	
	3	3965	
3	1	4046	3963
	2	3816	
	3	4026	
4	1	3911	3929
	2	3945	
	3	3931	
5	1	3721	3776
	2	3702	
	3	3904	
6	1	3816	3835
	2	3797	
	3	3892	
7	1	3816	3854
	2	3816	
	3	3931	

5.2.3 Estimativa da Profundidade de Fendas Verticais

5.2.3.1 Amostra 1 - Fenda com $h = 2,5$ cm

Como esta profundidade é muito pequena, foi difícil a obtenção das curvas de ondas com o procedimento de 75 mm de afastamento da fenda. Posicionou-se o transdutor a 50 mm antes da fenda e o outro 100 mm depois da fenda. A esfera de aço utilizada para o impacto foi de 11 mm,

espaçada a 50 mm depois da fenda. Além disso foi necessário um grande número de ensaios para a obtenção das formas de ondas esperadas.

Como descrito no item 3.5.2.2 a obtenção das profundidade requer experiência do operador e os transdutores devem estar bem acoplados para que a leitura seja realizada.

A Figura 5.49 apresenta a realização do ensaio e as Figuras 5.50 e 5.51 apresentam o gráfico obtido para obtenção da profundidade da fenda.



Figura 5.49 – Realização da leitura com Eco-Impacto – Obtenção da profundidade da fenda – Amostra 1.

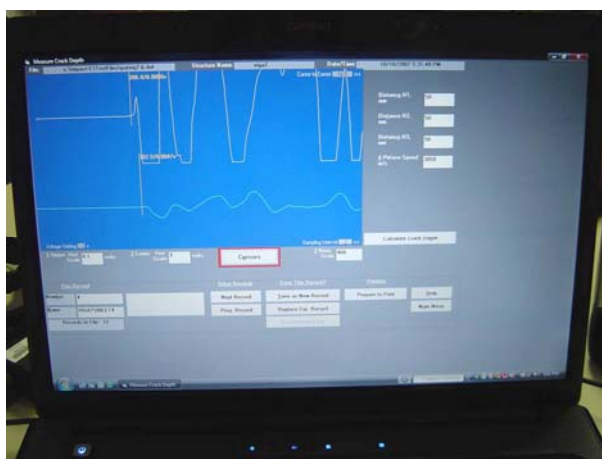


Figura 5.50 – Imagem no display das ondas na realização da leitura com Eco-Impacto – Obtenção da profundidade da fenda – Amostra 1.

A Figura 5.51 apresenta a curva obtida das ondas de tensão na estimativa da profundidade da fenda para amostra 1.

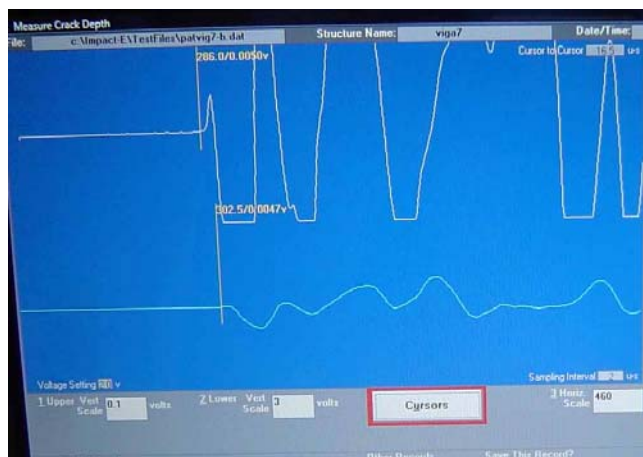


Figura 5.51 – Detalhe das ondas na realização da leitura com Eco-Impacto, com o posicionamento dos cursores – Amostra 1.

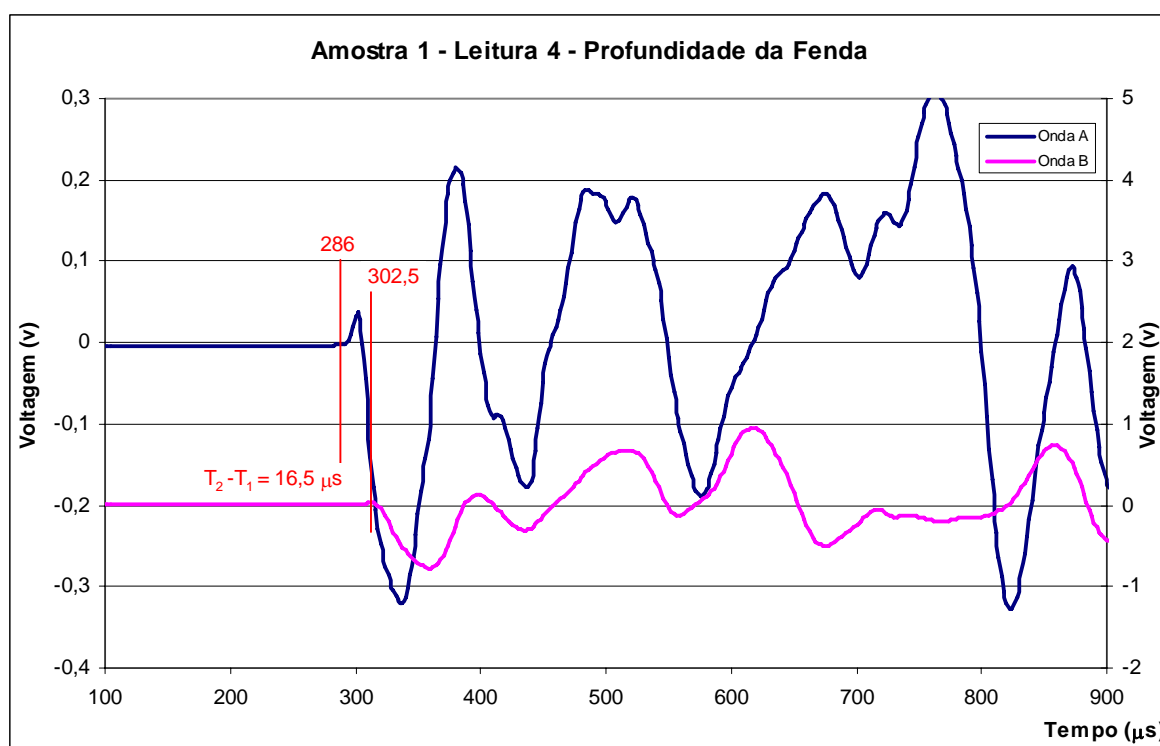


Figura 5.52 – Gráfico obtido com a leitura com Eco-Impacto – Obtenção da profundidade da fenda – Amostra 1.

Com os valores obtidos no item anterior, velocidade da onda $V_p = 3.850$ m/s e $X = 50$ mm têm-se que a estimativa da profundidade h , conforme o item 3.4.2, é:

$$\Delta t = (t_2 - t_1) + \frac{X_3}{V_p} = (16,5) + \frac{0,05}{3850} \times 10^6 = 29,49 \mu s$$

$$h = \sqrt{\frac{(V_p \Delta t)^2}{4} - X^2} = \sqrt{\frac{(3850 \times 29,49 \times 10^{-6})^2}{4} - 0,05^2} = 0,027 \text{ m, ou seja, } h = 2,70 \text{ cm}$$

A seguir está apresentada a tabela resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para a amostra 1.

Tabela 5.52 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 1.

Amostra 1 - Fenda Perpendicular - Profundidade de 2,5 cm		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3.850	2,7
2		2,7
3		2,7
4		2,7
5		2,7
6		2,7
7		3,4
8		1,7
9		3,4
10		1,7
Média		2,6
Desvio Padrão		0,57
Coeficiente Variação		21,9%

5.2.3.2 Amostra 2 - Fenda com h = 5 cm

A seguir está apresentada a tabela resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 2. Foram utilizados dois transdutores, sendo um posicionado a 75 mm antes da fenda e o outro 150 mm depois da fenda. A esfera de aço utilizada para o impacto foi de 11 mm, posicionada 75 mm depois da fenda.

Tabela 5.53 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 2.

Amostra 2 - Fenda Perpendicular - Profundidade de 5 cm		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3.689	5,6
2		5
3		5,6
4		5
5		5,6
6		5
7		5
8		4,3
9		5
10		5
Média		5,1
Desvio Padrão		0,40
Coeficiente Variação		7,8%

5.2.3.3 Amostra 3 - Fenda com $h = 7,5$ cm

Na amostra 3 foi usado o mesmo procedimento de leitura adotado na amostra 2 em que utilizam-se dois transdutores, sendo um a 75 mm antes da fenda e o outro 150 mm depois da fenda. A esfera de aço utilizada para o impacto foi de 11 mm espaçada a 75 mm depois da fenda.

A seguir está apresentada a tabela resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto, para a amostra 3.

Tabela 5.54 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 3.

Amostra 3 - Fenda Perpendicular - Profundidade de 7,5 cm		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3.772	8,1
2		7
3		8,1
4		8,6
5		8,1
6		7,5
7		7
8		7,5
9		8,1
10		7
Média		7,7
Desvio Padrão		0,58
Coeficiente Variação		7,5%

5.2.3.4 Amostra 4 - Fenda com $h = 10$ cm

Na amostra 4 foi usado o mesmo procedimento de leitura adotado na amostra 2, que prevê o posicionamento dos dois transdutores um a 75 mm antes da fenda e o outro 150 mm depois da fenda. A esfera de aço utilizado para o impacto foi de diâmetro de 11 mm, posicionada a 75 mm depois da fenda.

A seguir está apresentada a tabela resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 4.

Tabela 5.55 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 4.

Amostra 4 - Fenda Perpendicular - Profundidade de 10 cm		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3.866	10,4
2		9,7
3		10,3
4		10,7
5		9,2
6		10,7
7		10,7
8		10,7
9		10,7
10		10,34
Média		10,3
Desvio Padrão		0,51
Coeficiente Variação		5,0%

5.2.4 Estimativa da Profundidade de Fendas Inclinadas

5.2.4.1 Amostra 5 – Fenda com $h = 7,5$ cm

Foi utilizado o mesmo procedimento das fendas verticais, onde posiciona-se um transdutor a 75 mm antes da fenda e o outro 150 mm depois da fenda. A esfera de aço utilizada para o impacto foi de a 11 mm, posicionada 75 mm depois da fenda.

A Figura 5.53 apresenta o gráfico obtido das ondas da obtenção da profundidade da fenda.

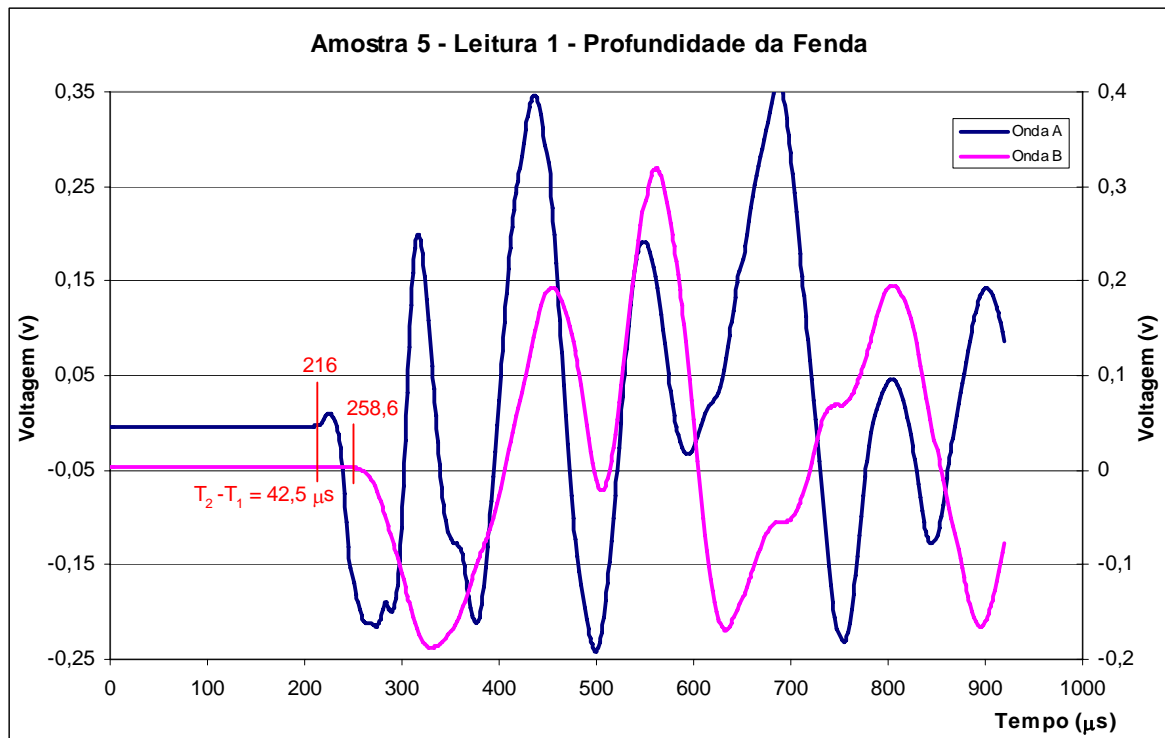


Figura 5.53 – Gráfico obtido com a leitura com Eco-Impacto – Obtenção da profundidade da fenda – Amostra 5.

Com os valores obtidos no item anterior, a velocidade da onda $V_p = 3.685$ m/s e $X = 75$ mm, temos que a estimativa da profundidade h , conforme o item 3.4.2 é:

$$\Delta t = (t_2 - t_1) + \frac{X_3}{V_p} = (42,5) + \frac{0,075}{3685} \times 10^6 = 62,85 \mu\text{s}$$

$$h = \sqrt{\frac{(V_p \Delta t)^2}{4} - X^2} = \sqrt{\frac{(3685 \times 62,85 \times 10^{-6})^2}{4} - 0,075^2} = 0,088 \text{ m, ou seja, } h = 8,8 \text{ cm}$$

A seguir está apresentada a tabela resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 5.

Tabela 5.56 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 5.

Amostra 5 - Fenda inclinada 22° - Profundidade de 7,5 vertical		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3685	8,8
2		8,3
3		7,3
4		7,3
5		7,3
6		8,8
7		7,8
8		7,8
9		7,3
10		7,8
11		7,8
Média		7,8
Desvio Padrão		0,57
Coeficiente Variação		7,3%

5.2.4.2 Amostra 6 - Fenda com h = 6,2 cm

O procedimento de leitura foi o mesmo utilizado na amostra 5, onde posiciona-se um transdutor a 75 mm antes da fenda e o outro a 150 mm depois da fenda. A esfera de aço utilizada para o impacto foi de 11 mm, posicionada a 75 mm depois da fenda.

A seguir está apresentada a tabela resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 6.

Tabela 5.57 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 6.

Amostra 6 - Fenda inclinada 40° - Profundidade de 6,2 vertical		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3.724	6,3
2		6,9
3		6,3
4		5,7
5		5,7
6		5,7
7		6,9
8		6,3
9		6,9
10		6,3
11		6,3
Média		6,3
Desvio Padrão		0,46
Coeficiente Variação		7,3%

5.2.4.3 Amostra 7 - Fenda com $h = 8,5$ cm

O procedimento de leitura foi o mesmo utilizado na amostra 5, onde posiciona-se um transdutor a 75 mm antes da fenda e o outro a 150 mm depois da fenda. A esfera de aço utilizada para o impacto foi de 11 mm, posicionada a 75 mm depois da fenda.

A seguir está apresentada a tabela resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto.

Tabela 5.58 – Resumo das profundidades obtidas com o eco-impacto para amostra 7.

Amostra 7 - Fenda inclinada 45° - Profundidade de 8,5 vertical		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3.694	8,8
2		7,9
3		8,4
4		8,8
5		7,9
6		8,4
7		8,4
8		7,9
9		8,4
10		7,9
11		7,9
Média		8,2
Desvio Padrão		0,36
Coeficiente Variação		3,9%

5.2.5 Análise dos resultados das fendas verticais e inclinadas

5.2.5.1 Comparativo entre Velocidades

A Tabela 5.59 apresenta um resumo das velocidades obtidas em cada amostra conforme os procedimentos utilizados para obtenção da mesma.

Tabela 5.59 – Resumo das velocidades obtidas com o eco-impacto.

Amostra		Procedimento Transdutores fixos a 30 cm	Procedimento B - ASTM C1383
Verticais	1 (h=2,5 cm)	3850	3956
	2 (h=5,0 cm)	3693	3985
	3 (h=7,5 cm)	3772	3963
	4 (h=10 cm)	3866	3929
Inclinadas	5 (h=7,5 cm)	3685	3776
	6 (h=6,2 cm)	3724	3835
	7 (h=8,5 cm)	3694	3854

No procedimento com os transdutores fixos a 30 cm obtém-se a velocidade de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta, ou seja, velocidade na superfície do concreto. Já no procedimento B da ASTM C1383 obtém-se a velocidade no corpo íntegro da amostra, ou seja, uma velocidade maior conforme já relatado na utilização do ultra-som.

5.2.5.2 Comparativo das profundidades das fendas

A Tabela 5.60 apresenta um resumo das profundidades estimadas com a utilização do eco-impacto.

Tabela 5.60 – Resumo das profundidades das fendas estimadas pelo eco-impacto.

Amostra		Profundidade Real (cm)	Profundidade Média (cm)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Erro (%)
Verticais	1	2,5	2,64	0,57	22%	6%
	2	5	5,11	0,40	8%	2%
	3	7,5	7,70	0,58	7%	3%
	4	10	10,34	0,51	5%	3%
Inclinadas	5	7,5	7,85	0,46	7%	5%
	6	6,2	6,30	0,57	7%	2%
	7	8,5	8,25	0,36	4%	3%

A Figura 5.54 apresenta as curvas obtidas entre a relação da profundidade (h) e o coeficiente de variação das leituras para as fendas verticais e inclinadas.

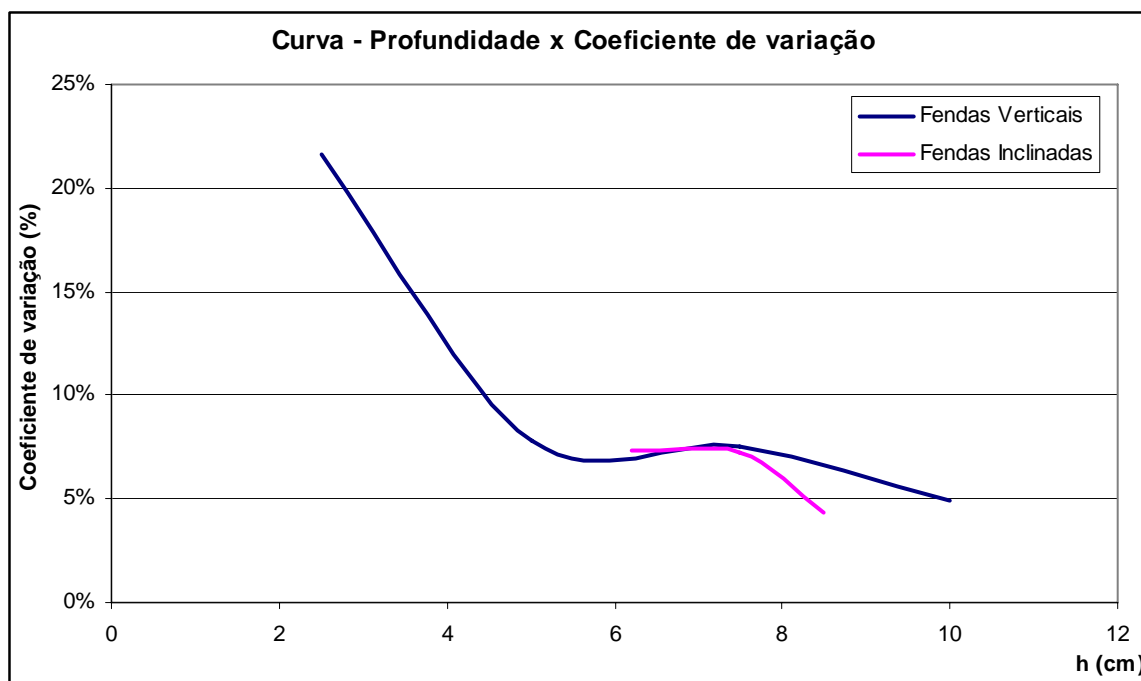


Figura 5.54 – Gráfico obtido com a leitura com Eco-Impacto – Obtenção da profundidade da fenda – Amostra 5.

Conforme a Tabela 5.60 e a Figura 5.54 é possível distinguir que para fendas com profundidade aproximadamente de 6 cm quanto menor for a profundidade da fenda maior é o coeficiente de variação, ou seja, o desvio padrão aparentemente é independente da profundidade da fenda.

A estimativa da profundidade das fendas, tanto verticais quanto inclinadas, com a utilização do eco-impacto obteve resultados satisfatórios, chegando a um erro de, no máximo, 6 %.

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE O ULTRA-SOM E O ECO-IMPACTO

A seguir está apresentada uma tabela resumo comparativo das velocidades obtidas com o ultra-som (modo de transmissão indireto e modelo linear 10/10_{5/5}) e com o eco-impacto (transdutores fixos a 30 cm e procedimento B ASTM C1383).

Tabela 5.61 – Resumo das velocidades de propagação da onda obtidas com o ultra-som e o eco-impacto.

Amostra	h real (cm)	Ultra-som		Eco-Impacto		
		V _{indireto} (m/s)	V _{linear} (m/s)	V _{transdutores fixos} (m/s)	V _{proc. B - ASTM C1383} (m/s)	
Verticais	1	2,5	3844	3962	3850	3956
	2	5	3655	3860	3693	3985
	3	7,5	3481	3941	3772	3963
	4	10	3772	3833	3866	3929
Inclinadas	5	7,5	3893	4008	3685	3776
	6	6,2	3807	4018	3724	3835
	7	8,5	3834	4173	3694	3854

Já a Tabela 5.62 apresenta-se o resumo comparativo entre as profundidades obtidas com o ultra-som (modelo 2, modelos linear e equidistante) e com o eco-impacto juntamente com o erro encontrado na estimativa da profundidade da fenda.

Tabela 5.62 – Resumo das profundidades das fendas obtidas com o ultra-som e o eco-impacto.

Amostra	h real (cm)	Ultra-som						Eco-Impacto		
		Modelo 2 (BS, 1986)		Linear (10/10 _{5/5}) (Pinto, 2007)		Equidistante (Pinto, 2007)		h _{estimado} (cm)	Erro (%)	
		h _{estimado} (cm)	Erro (%)	h _{estimado} (cm)	Erro (%)	h _{estimado} (cm)	Erro (%)			
Verticais	1	2,5	3,6	44%	6,31	152%	4,6	84%	2,64	6%
	2	5	4,2	16%	7,23	45%	5,65	13%	5,11	2%
	3	7,5	8,7	16%	9,51	27%	7,59	1%	7,7	3%
	4	10	11,5	15%	9,61	4%	11,48	15%	10,34	3%
Inclinadas	5	7,5	9,6	28%	8,06	7%	9,31	24%	7,85	5%
	6	6,2	10,6	71%	6,87	11%	8,5	37%	6,3	2%
	7	8,5	9,4	11%	8,19	4%	9,52	12%	8,25	3%

É possível perceber que, para estimativa da profundidade de fenda com a utilização do ultra-som não se estabelece um procedimento que forneça sistematicamente os menores erros relativos, tornando este equipamento utilizável por qualquer procedimento. Quando existir a possibilidade de acesso nos dois lados da fendas, poderá ser utilizado o procedimento onde se varia o transdutor-transmissor e o transdutor-receptor equidistantes, conforme o modelo 2 e o modelo equidistante. Já nas peças onde não se tem espaço para realização deste procedimento poderá ser utilizado o procedimento onde se fixa o transdutor-transmissor de um lado da fenda e varia-se o transdutor-receptor no lado contrário. Com o ultra-som é possível à estimativa da profundidade

das fendas verticais pelo modelo equidistante obtendo-se um erro máximo de 15 %. Já para as fendas inclinadas pelo modelo linear é possível a estimativa da profundidade das fendas com um erro máximo de 11 %. Estes erros estão em uma mesma ordem de grandeza, excluindo-se a profundidade de 2,5 cm que não pode ser estimada. Já o modelo 2 obteve uma boa resposta para as fendas verticais obtendo erro próximo a 16 %.

Já os resultados obtidos com o eco-impacto são mais precisos que o ultra-som, além de obter estimativas com um melhor parâmetro, conforme desvio padrão obtido nos itens 5.2.2 e 5.2.3 e a um erro médio de 3 %. A fenda com profundidade de 2,5 cm teve uma boa resposta ficando com um erro de 6 %. Cabe destacar que destas leituras para profundidades pequenas, requer paciência e muitos ensaios para obtenção de resultados coerentes.

5.4 OBSERVAÇÕES COM RELAÇÃO À UTILIZAÇÃO DO ECO-IMPACTO

Como o eco-impacto é um equipamento novo no Brasil, serão listadas abaixo algumas observações do operador na busca da estimativa de profundidades de fendas.

- Operador: é necessário que os operadores sejam treinados para a obtenção das leituras pois influenciam consideravelmente nos resultados finais.
- Analista: este também deverá ter um treinamento para interpretação dos resultados, pois os resultados são influenciados consideravelmente conforme a interpretação da forma da onda.
- Esferas de aço: pequenas esferas são de difícil impacto e com isto dificulta a obtenção das formas das ondas esperadas. Estas deverão variar entre 8 mm e 12,5 mm para obtenção do impacto na estimativa da profundidade das fendas.
- Distância entre transdutores e impacto: As distâncias dos transdutores e do impacto, também influenciam nas leituras, distâncias menores que 5 cm e maiores que 10 cm dificultam a operação com os transdutores e esfera de aço. A distância de 7,5 cm forneceu formas das ondas esperadas, pois possibilitou espaço suficiente para o operador com os dois transdutores acoplados e para o segundo operador com o impactador (esfera de aço).

- Obtenção das velocidades da onda com transdutores fixos e esfera acoplada: para obtenção da onda é necessário que o impacto com a esfera de aço ocorra simultaneamente com a acoplagem dos transdutores.
- Acoplagem dos transdutores: os transdutores deverão ser acoplados e mantidos até o impacto com a esfera de aço na estimativa da profundidade de fendas.
- Distâncias: o ponto definido para o impacto é de grande influência nas formas de ondas, quando o impacto da esfera é aplicado fora deste ponto, ocorrem variações nos resultados obtidos.
- Impacto: o impacto deverá ser realizado sem arrastar a esfera, de um modo seco na batida com a superfície do concreto.
- Procedimento A ASTM C1383: Para realização deste modo de obtenção da velocidade de propagação a dimensão da peça sem presença de falhas, ou seja, região com concreto íntegro, deverá ser maior que 500 mm.
- Posicionamento dos cursores: o posicionamento dos cursores nas formas das ondas influenciam consideravelmente na obtenção de bons resultados, é necessário posicionar os transdutores no início da concavidade da curva.

CAPÍTULO 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo estimar a profundidade de fendas com a utilização dos ensaios não destrutivos de ultra-som e eco-impacto. Para tanto, foram induzidas fendas verticais e inclinadas de dimensões conhecidas em amostras de concreto confeccionadas em laboratório, analisando e comparando os resultados obtidos com estes dois métodos não destrutivos.

6.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no programa experimental, conclui-se que os dois métodos não destrutivos de ultra-som e eco-impacto conseguem estimar as profundidades de fendas superficiais tanto verticais como inclinadas.

Cumprindo com o objetivo geral deste trabalho, o ultra-som, através dos modelos apresentados foi capaz de estimar a profundidade de algumas fendas superficiais, perpendiculares e inclinadas à superfície com precisão média de 10 %, utilizando modelos matemáticos específicos.

O eco-impacto, por outro lado, mostrou-se ser um equipamento de melhor precisão na estimativa da profundidade de fendas, obtendo-se um erro médio de 3%. Este método consegue estimar pequenas fendas superficiais, que não pode ser estimada com a utilização do ultra-som.

- Quanto à utilização do Ultra-som

Os valores de velocidade de propagação da onda pelo modo de transmissão indireto, utilizados no modelo 1, foram sistematicamente menores que os valores estimados pelos modelos linear e eqüidistante nas amostras com fendas verticais. Isto confirma a hipótese que a velocidade da onda obtida pelo método indireto na superfície da amostra apresenta valores mais baixos em relação à velocidade ao longo da altura da amostra.

Para as fendas verticais, entre 5,0 e 10,0 cm, o modelo eqüidistante apresentou um erro máximo de 15 % na estimativa das profundidades de fendas, valor bem inferior aos observados pelos outros modelos matemáticos. Já para as fendas inclinadas, o modelo linear foi o que apresentou

um máximo erro 11 %. Ambos estes modelos permitiram a estimativa da velocidade de propagação da onda através da fenda.

O modelo 2, proposto pela BS também obteve bons resultados para as fendas verticais, com um erro máximo de 16 %.

Para fendas muito rasas de 2,5 cm, os erros obtidos por todos os modelos matemáticos superaram 85 %, evidenciando que o ultra-som não consegue estimar fendas com pequenas profundidades. Por outro lado fendas com profundidade superior a 5 cm foram passíveis de detecção.

Em todas as amostras, confirmou-se que para uma possível estimativa das profundidades de fendas, tanto verticais quanto inclinadas, a relação entre a profundidade da fenda (h) com a distância do eixo dos transdutores ao centro da fenda “ X ”, deve estar entre $X / h > 1,0$ até $X / h < 4,0$.

Para realização de leituras no campo, quando existir a possibilidade de acesso nos dois lados da fenda, indica-se a utilização do modelo matemático equidistante, onde se varia simultaneamente a posição dos transdutores (transmissor e receptor). Já nas peças onde não se tem espaço para realização deste procedimento, indica-se a utilização de um procedimento onde se fixa o transdutor-transmissor de um lado da fenda, variando o transdutor-receptor no lado oposto, equivalente ao modelo matemático linear.

Para definição da posição dos transdutores em campo, sugere-se realizar a primeira leitura com os transdutores espaçados em 5 cm. Caso a primeira leitura seja maior que a segunda, é indicativo que esta fenda é profunda ou inclinada. Com isto é necessário aumentar este espaçamento inicial até não se obter valores superiores de tempo de propagação na segunda leitura.

- Quanto à utilização do Eco-impacto

A velocidade de propagação da onda obtida pelo procedimento B da ASTM C 1383, ou seja, através da frequência, demonstrou ser mais fácil para obtenção das leituras, porém era necessário o conhecimento de um parâmetro da peça, no caso: a espessura.

As distâncias dos transdutores e do impacto à fenda poderão variar de 5 a 10 cm. Entretanto, observou-se que a distância de 7,5 cm forneceu a obtenção de formas de ondas esperadas, já que possibilitou uma posição mais confortável para os operadores.

Para utilização deste equipamento é preciso conhecimento do operador na execução das leituras, e conhecimento do analista na interpretação dos resultados e definição dos tempos de chegada da onda. As esferas de aço para produção do impacto, foram maiores e iguais a 8 mm, pois pequenas esferas dificultaram a obtenção das formas das ondas.

Os resultados obtidos com o eco-impacto foram mais precisos que os do ultra-som, com um erro médio de 3 %. A fenda com profundidade de 2,5 cm teve uma boa resposta ficando com um erro de 6 %, porém na realização destas leituras foi necessário paciência e um grande número de ensaios para obtenção de resultados coerentes.

- Observações na utilização do Eco-impacto

Como o eco-impacto é um equipamento novo no Brasil, serão listadas abaixo algumas observações do operador na busca da estimativa de profundidades de fendas.

- ✓ É necessário um prévio treinamento dos operadores para a obtenção das leituras e interpretação dos resultados.
- ✓ A utilização de pequenas esferas é de difícil obtenção de formas de ondas esperadas. Sugere-se que estas variem entre 8 mm e 12,5 mm.
- ✓ Para obtenção da velocidade de propagação da onda com os transdutores fixos com a esfera acoplada é necessário que o impacto e a acoplagem dos transdutores ocorram simultaneamente
- ✓ Na estimativa da profundidade de fendas, os transdutores deverão ser acoplados e mantidos até o impacto com a esfera de aço.
- ✓ Cuidado deve ser tomado quando do impacto, que deverá ser realizado sem arrastar a esfera, de um modo seco com a superfície do concreto.

6.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto vem possibilitando a utilização de ensaios não destrutivos na busca de anomalias no concreto, pois estes ensaios são seguros e não causam danos ao elemento estrutural. Como ainda não existem muitas pesquisas no Brasil na busca da estimativa de profundidades de aberturas superficiais no concreto, é necessário o desenvolvimento de técnicas em laboratório para definição de procedimentos a serem utilizados em campo. Como sugestão para novos trabalhos, bem como de prosseguimento deste, propõe-se estudar os seguintes aspectos:

- ✓ modelos matemáticos para a estimativa da profundidade de fendas inclinadas, buscando estimar também o ângulo de inclinação destas quando utilizado o ultra-som;
- ✓ utilizar o ultra-som e o eco-impacto em campo, em estruturas de concreto moldados *in loco*, onde as aberturas são causadas por efeitos como sobrecargas, retração, corrosão de armaduras, entre outros;
- ✓ avaliar a eficácia das estimativas com o ultra-som e com o eco-impacto para profundidades de fendas maiores que 10 cm;
- ✓ criar um programa de análise dos dados para detecção do ponto exato do início da onda nos resultados com o eco-impacto;
- ✓ avaliar a influência de armaduras nas leituras obtidas com o eco-impacto para a estimativa da profundidade das aberturas;
- ✓ avaliar se o eco-impacto é capaz de detectar se uma fenda foi preenchida totalmente com material adequado para reparos, como resinas epóxi, ou apenas selada superficialmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, I. R., **Emprego do esclerômetro e do ultra-som para efeito da avaliação qualitativa dos concretos de alto desempenho.** Tese para concurso de Professor Titular, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil, 124 p, 1993.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 228. **Nondestructive test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.** ACI 228, 2R-98, American Concrete Institute, EUA, 62 p, 1998.

_____ACI 364, 1R. **Guide for evaluation of concrete structures prior to rehabilitation.** ACI Material Journal, Sep/Oct, p. 479-498, 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C 597. **Standard test method for pulse velocity through concrete.** 1991.

_____ASTM C 1383. **Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates using the Impact-Echo Method.** West Conshohocken, PA, 2000.

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

_____NBR 5739 - **Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1994.

_____NBR 6118 – **Projeto de estruturas de concreto armado – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2003.

_____NBR 8802: **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica.** Rio de Janeiro, 1985.

_____NBR 8802: **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica.** Rio de Janeiro, 1994.

BORGES, F. P. S., **Otimização via algoritmo genético do processo construtivo de estruturas de concreto submetidos à retração restringida tendo em vista a fissuração nas primeiras idades**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 97 p, 2006.

BRITISH STANDARD INSTITUTION, BS 1881: Part 201, **Guide to the use of nondestructive methods of test for hardened concrete**, London, 1986.

_____ BS 1881: PART 203, **Recommendations for measurement of the velocity of ultrasonic pulses in concrete**. London, 1986.

BUNGEY, J. H., **The testing of concrete in structures**, 2 ed. London, Surrey University Press, 1989.

CARINO, N. J., **The impact-echo method: An overview**, Structures Congress & Exposition, May 21-23, 2001, Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, Peter C. Chang, Editor, 18 p, 2001.

_____ Stress wave propagation methods, **CRC handbook on nondestructive testing of concrete**, Tarun R. Naik and V M Malhotra eds, CRC Press, pp 289-323, 2004.

ÇAM, E. ORHAN, S. e LÜY, M., **An analysis of cracked beam structure using impact echo method**, NDT & E international, Faculty of Engineering, Kırıkkale University, Turkey, 6 p, 2004.

CASTRO, P. F., **Dureza superficial e de pulso ultra-sônico para verificação da homogeneidade do concreto**, Engenharia Estudo e Pesquisa – Rio de Janeiro, p. 25-31, 2000.

CHENG, C., and Sansalone, M., **Effects on impact-echo signals caused by steel reinforcing bars and voids around bars**, ACI Materials Journal, Vol. 90, No. 5, Sept-Oct., pp. 421-434, 1993b.

CHUNG, H. W.; LAW, K. S., **Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique**, Concrete International, October, p. 42-49, 1983.

DAL MOLIN, D. C. C., **Fissuras em estruturas de concreto armado – Análise das modificações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 220 p, 1988.

DORNELLES, F. L., PINTO, R. C. A., e PADARATZ, I. J., **Influência do Posicionamento da Armadura em Medições de Ultra-Som para Avaliação da Resistência à Compressão do Concreto**, Encontro Nacional Betão Estrutural 2004, Actas, Porto, Portugal, p. 1015-1022, 2004.

_____ **Detecção de falhas internas de concretagem através do uso do ultra-som**. 47º IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. Olinda, 2005.

ELVERY, R. H.; IBRAHIM, L. A. M.; **Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages**, Magazine of Concrete Research, December, p. 181-190, 1976.

EVANGELISTA, A. C. J., **Avaliação da resistência do concreto utilizando diferentes ensaios não-destrutivos**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 217 p, 2002.

FIGUEREDO, E, J, P., **Metodologia de avaliação de sistemas epóxi destinados à injeção de fissuras passivas das estruturas de concreto**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Porto Alegre, Porto Alegre, 120p, 1989.

HAMASSAKI, L. T., **Utilização do ultra-som em concreto**, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 108 p, 1986.

HELENE, P. R. L., **Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto**, *Red Rehabilitar* editores. São Paulo, 2003.

ISSA, A. I.; DEBS, P., **Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete**, Constructing and Building Materials 21, pp 157-163, September 2005.

JAEGER, B.J., Sansalone, M.J., and Poston, R.W., **Detecting voids in grouted tendon ducts of post-tensioned concrete structures using the impact-echo method**, ACI Structural Journal, Vol. 93, No. 4, July-August, pp. 462-472, 1996.

KNAB, L. I.; BLESSING, G. V.; CLIFTON, J. R., **Laboratory evaluation of ultrasonic for cracks detection in concrete**. ACI Materials Journal, V80, N3 p. 17-27. November-December 1983.

KOMLOS, K.; POPOVICS, S.; NUMBERGEROVA, T.; BABAL, B.; POPOVICS, J. S., **Comparison of five standards on ultrasonic pulse velocity testing of concrete**, Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP, Vol. 18, N° 1, p. 42-48, June 1996.

LIN, Y., Sansalone, M. and Carino, N.J., **Impact-echo response of concrete shafts**, ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 14, No. 2, June, pp. 121-137, 1991b.

LIN, Y. and Sansalone, M., **Detecting flaws in concrete beams and columns using the impact-echo method**, ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 4, July-August 1992, pp. 394- 405, 1992a.

_____ **Transient response of thick circular and square bars subjected to transverse elastic impact**, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 91. No.2, February 1992, pp. 885-893, 1992b.

_____ **Transient response of thick rectangular bars subjected to transverse elastic impact**, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 91, No. 5, May 1992, pp. 2674-2685, 1992c.

LIN, J. M., and Sansalone, M., **A procedure for determining P-wave speed in concrete for use in impact-echo testing using a rayleigh wave speed measurement technique**, Innovations in Nondestructive Testing, SP-168, S. Pessiki and L. Olson, Eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp.137-165, 1997.

MALHOTRA, V. M., **In situ/nondestructive testing of concrete - A Global Review**, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, p. 1-16, 1984.

MANUAL TÉCNICO, **Recuperação de estruturas**, Vedacit, 1º Edição.

MEDEIROS, A, **Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fissuras superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 158p, 2007.

MENEGHETTI, L. C., **Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultra-som**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 163p, 1999.

METHA, P. K.; MOTEIRO, P. J. M., **Concreto – estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, PINI, 573 p, 2000.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do concreto**, Editora PINI, São Paulo, 828 p, 1997.

NAIK, T. R., MALHOTRA, V. M., The ultrasonic pulse velocity method. In: Malhotra V. M., Carino N. J. (eds), **CRC handbook on nondestructive testing of concrete**, 1 ed., chapter 7, Boston, USA, CRC Press, 1991.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S., The ultrasonic pulse velocity method, **CRC handbook on nondestructive testing of concrete**, Tarun R. Naik and V M Malhotra eds, CRC Press, pp 169-189, 2004.

PADARATZ, I. J., **Apostila de patologia das edificações**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

PINTO, R. C. A.; MEDEIROS, A.; PADARATZ, I. J., **Ultrasonic to estimative depth of surface opening cracks**, enviado para publicação no ACI Material Journal, 2007.

POPOVICS, J. S.; SONG, W.; GHANDEHARI, M.; SUBRAMANIAM, K.V.; ACHENBACH, J. D.; SHAH, S. P., **Application of surface wave transmission measurements for crack depth determination in concrete**. ACI Materials Journal, V97, N2, March-April 2000.

Pundit Manual, CNS Eletronics Ltd., London, 76 p.

RILEM, NDT 1, **Testing of concrete by the ultrasonic pulse method**, 1972.

SANSALONE, M., and Streett, W. B., **Impact-Echo: Nondestructive testing of concrete and masonry**, Bullbrier Press, Jersey Shore, PA, 1997.

SANSALONE, M., LIN, J., and Streett, W. B., 1998, **Determining depth of surface-opening cracks using impact-generated stress waves and time-of-flight techniques**, ACI, Vol. 95 N° 2, 10 p, Março-Abril 1998.

SELLECK *et al*, **Ultrasonic investigation of concrete with distributed damage**, ACI Materials Journal, January-February, p. 27-36, 1998.

STURRUP, V. R.; VECCHIO, F. J.; CARATIN, H., **Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength**. In Situ/Non Destructive Testing of Concrete, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, p 201-228, 1984.

ANEXO A

A seguir será apresentado um resumo de algumas normas para realização do ensaio do ultra-som.

	ASTM C597 (1983)	BS 1881 Part 204(1986)	DIN/ISO 8047 (1983) (*)	STN 73 1371 (*)	GOST 17624 (1987) (*)	Rilem (1972)	NBR 8802 (1994)
Tipo de frequência transmitida do transdutor	50 kHz e superior	20 a 150 kHz (***)	40 a 60 kHz, em casos excepcionais pode chegar a 200 kHz	20 a 500 kHz	Resposta e medida de tempo de propagação atenuada: 0 a 999 ns. A medida de frequência necessada do transdutor depende do tipo de concreto e coeficiente pozzolânico	20 a 300 kHz	24 a 500 kHz
Posição dos transdutores		Possibilidade de qualquer tipo de arranjo de posição dos transdutores. Podendo ser de frente, de trás, semi- e indireta.			Frente direta e indireta de transmissão	Transmissão direta, para quando entre eixo de transmissão (direção de onda) e direção de onda é retilínea.	Transmissão direta, transmissão indireta e transmissão semi-direta
Espectro de frequência e o conteúdo de		Estabelecer-se especificações sobre o espectro de ondas senoidais.			Superfície seja plana e deve ser usada a superfície lateral paralela à direção de propagação		
Tempo de transmissão medida	Previsão de 2, 7% de variação admissível. Tempo de transmissão em percento de 0,5%	Previsão de 2, 7% de variação admissível, variando o tempo (relação) para um erro ± 0,2 µs, em previsão de um erro de 0,15%	A distância entre o centro dos transdutores pode ser escolhida entre o comprimento de onda e o comprimento de onda ± 1%	Previsão ± 1%	Previsão de 2, 7% em comprimento de onda e ± 1% de erro de medição. Espantoso erro do conteúdo não pode exceder 1 (1) mm.	Superfície plana	Erro de ± 30µs, para a frente de onda
Características elétricas e mecânicas dos transdutores	Mínimo de 50 mm e máximo de 13 m. Previsão 0,5%	Previsão ± 1%	Previsão ± 0,5 % em comprimento convencional e ± 1 % de erro de medição. Espantoso erro do conteúdo não pode exceder 1 (1) mm.	Previsão ± 0,5 % em comprimento convencional e ± 1 % de erro de medição. Espantoso erro do conteúdo não pode exceder 1 (1) mm.	Previsão 0,5%	Previsão de 2%	Previsão de 1, 2%
Dimensões e eixos	Velocidade independente das dimensões. Permita a maior dimensão lateral deve ser superior ao comprimento de onda. O eixo de onda deve ser	Velocidade independente das dimensões. Permita a maior dimensão lateral mínima seja 80 mm para frequência entre 40 e 60 kHz.	Definido que a dimensão lateral mínima seja 80 mm para frequência entre 40 e 60 kHz.	Definido que a dimensão lateral mínima seja 80 mm para frequência entre 40 e 60 kHz.			
Resposta de frequência							
Resposta de amplitude							
Amplitude							
Temperatura							
Amplitude de onda e velocidade de propagação							

(*) Estas normas estão de acordo com Komlos (1996)

(**) Para haver uma aderência no contato entre o transdutor e a face do concreto (evitar presença de vazios) é típico o uso de: petróleo, graxa, sabão mole, vaselina e pasta de glicerina.

(***) 10 kHz para comprimento muito longo e 1 MHz para argamassas e grautes.

	ASTM C597 (1983)	BS 1881 Part 204(1986)	DIN/ISO 8047 (1983) (*)	STN 73 1371 (*)	GOST 17624 (1987) (*)	Rilem (1972)	NBR 8802 (1994)
Resposta de frequência							
Resposta de amplitude							
Amplitude							
Temperatura							
Amplitude de onda e velocidade de propagação							

(*) Estas normas estão de acordo com Komlos (1996)

(**) Para haver uma aderência no contato entre o transdutor e a face do concreto (evitar presença de vazios) é típico o uso de: petróleo, graxa, sabão mole, vaselina e pasta de glicerina.

(***) 10 kHz para comprimento muito longo e 1 MHz para argamassas e grautes.

ANEXO B

A seguir estão apresentadas as tabelas referentes à análise física e química do cimento e a caracterização dos agregado graúdo (brita 1) e agregado miúdo (areia fina).

Tabela 6.1 – Análise física e química do cimento CPII Z-32.

	Item de Controle	Unid.	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Ensaio Físicos	Material Retido #200 (mesh)	%	1,84	0,20	1,4	2,2
	Material Retido #325 (mesh)	%	11,06	1,13	9,5	13,6
	Blaine	cm ² /g	3489	93,7	3290	3700
	Água de Consistência	%	27,78	0,12	27,4	28,0
	Início de Pega	Horas	268	16	245	300
	Fim de Pega	Horas	338	26	240	380
	Expansibilidade a Quente	mm	0,48	0,32	0	1
	Resistência R1	Mpa	-	-	-	-
	Resistência R3	MPa	24,90	0,93	22,70	26,00
	Resistência R7	MPa	29,53	0,96	27,40	31,40
	Resistência R28	MPa	36,06	0,70	34,80	37,50
Obs: Resistências R28 referem-se ao mês de			junho de 2007			
Ensaio Químicos	Perda ao Fogo	%	5,36	0,19	4,88	5,73
	SiO ₂	%	22,01	0,55	20,72	22,78
	AL ₂ O ₃	%	6,46	0,46	5,46	7,13
	Fe ₂ O ₃	%	3,29	0,11	3,10	3,49
	CaO	%	53,62	1,21	51,81	56,12
	MgO	%	5,88	0,14	5,61	6,19
	K ₂ O	%	1,03	0,04	0,88	1,08
	Na ₂ O	%	0,06	0,00	0,05	0,07
	SO ₃	%	2,68	0,15	2,15	2,89
	Resíduo Insolúvel	%	11,39	1,55	7,90	13,81
	CO ₂	%	4,66	0,23	3,97	4,95

(*) Massa específica deste cimento – 2,99 kg/dm³

Tabela 6.2 – Caracterização da brita 1.

Peneiras # (mm)	Massa (g)	% retida	% acumulada
25	0	0,0	0,0
19	7,5	0,2	0,2
12,5	2195,1	43,9	44,1
9,5	1775,5	35,5	79,6
6,3	957,1	19,1	98,7
4,8	33,1	0,7	99,4
Fundo	31,7	0,6	100,0
Total	5000	100	
Módulo de finura			2,79
Diâmetro máximo			19 mm
Massa específica aparente			2,60 kg/dm ³
Massa unitária solta			1,36 kg/dm ³
% material pulverulento			0,56 %

Tabela 6.3 – Caracterização da areia fina.

Peneiras # (mm)	Massa (g)	% Retida	% Ret. acumulada
6,3	0	0	0
4,8	0	0	0
2,4	0	0	0
1,2	8,8	1,76	1,76
0,6	181,5	36,3	38,06
0,3	190,5	38,1	76,16
0,15	87,9	17,58	93,74
Fundo	31,3	6,26	100
Total	500	100	
Módulo de finura			3,10
Diâmetro máximo			1,2 mm
Massa específica			2,59 kg/dm ³
Material pulverulento			6,26 %
Massa unitária solta			1,33 kg/dm ³

ANEXO C

Resultados obtidos na estimativa da profundidade da fenda de 10 cm da amostra 4 variando as esferas de aço para o impacto de 6,5 a 12,5 mm.

Tabela 6.4 – Resumo das profundidades obtidas com esfera de 6,5 mm para amostra 4.

Amostra 4 - Fenda Perpendicular - Profundidade de 10 cm - Haste 6,5 mm		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3866	9,9
2		11,2
3		11,2
4		9,9
5		9
6		11,2
7		9,5
8		9,5
9		10,3
10		10,8
Média		10,3
Desvio Padrão		0,81
Coeficiente de Variação		8%

Tabela 6.5 – Resumo das profundidades obtidas com esfera de 8,0 mm para amostra 4.

Amostra 4 - Fenda Perpendicular - Profundidade de 10 cm - Haste 8 mm		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3866	10,3
2		9,9
3		10,8
4		10,3
5		9
6		10,8
7		10,3
8		10,3
9		10,3
10		10,3
Média		10,2
Desvio Padrão		0,51
Coeficiente de Variação		5%

Tabela 6.6 – Resumo das profundidades obtidas com esfera de 9,5 mm para amostra 4.

Amostra 4 - Fenda Perpendicular - Profundidade de 10 cm - Haste 9,5 mm		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3866	10,8
2		9,8
3		9,9
4		9,5
5		9
6		9,9
7		10,3
8		9,5
9		10,3
10		10,3
Média		9,9
Desvio Padrão		0,52
Coeficiente de Variação		5%

Tabela 6.7 – Resumo das profundidades obtidas com esfera de 11,0 mm para amostra 4.

Amostra 4 - Fenda Perpendicular - Profundidade de 10 cm - Haste 11 mm		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3866	9,9
2		9,9
3		9,9
4		10,8
5		9
6		9,9
7		9,9
8		9,9
9		10,7
10		10,6
Média		10,1
Desvio Padrão		0,53
Coeficiente de Variação		5%

Tabela 6.8 – Resumo das profundidades obtidas com esfera de 12,5 mm para amostra 4.

Amostra 4 - Fenda Perpendicular - Profundidade de 10 cm - Haste 12,5 mm		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3866	9,9
2		9,9
3		9,5
4		9,9
5		10,8
6		9,5
7		10,3
8		9,9
9		10,3
10		10,9
11		10,3
Média		10,1
Desvio Padrão		0,46
Coeficiente de Variação		5%

ANEXO D

Resultados obtidos na estimativa da profundidade da fenda de 10 cm da amostra 4 variando a distância X da posição dos transdutores e do impacto de 5,0 a 10 cm.

Tabela 6.9 – Resumo das profundidades obtidas com distância de 5,0 cm para amostra 4.

Amostra 4 - Fenda Perpendicular - Profundidade de 10 cm - Haste 11 mm		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3866	9,9
2		9,9
3		9,9
4		10,8
5		9
6		9,9
7		9,9
8		9,9
9		10,7
10		10,6
Média		10,1
Desvio Padrão		0,53
Coeficiente de Variação		5%

Tabela 6.10 – Resumo das profundidades obtidas com distância de 7,5 cm para amostra 4.

Amostra 4 - Fenda Perpendicular - Profundidade de 10 cm - Haste 11 mm		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3866	10,4
2		9,7
3		10,3
4		10,7
5		9,2
6		10,7
7		10,7
8		10,7
9		10,7
10		10,34
Média		10,3
Desvio Padrão		0,51
Coeficiente de Variação		5%

Tabela 6.11 – Resumo das profundidades obtidas com distância de 10,0 cm para amostra 4.

Amostra 4 - Fenda Perpendicular - Profundidade de 10 cm – Haste 11 mm		
Leitura	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
1	3866	10,9
2		10,3
3		9,2
4		11,4
5		9,2
6		10,9
7		11,4
8		10,3
9		11,4
10		10,9
Média		10,6
Desvio Padrão		0,84
Coeficiente de Variação		8%

ANEXO E

A seguir estão apresentados os resultados obtidos com as leituras pelo modo de transmissão indireta com a utilização do ultra-som para estimativa da velocidade de propagação da onda.

Tabela 6.12 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 1.

Indireto			
Emissor (cm)	Receptor (cm)	Leitura 1 (μ s)	Leitura 2 (μ s)
5	15	25,8	26
	25	51,6	52
	35	80,5	81
	45	103	102,5

Tabela 6.13 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 2.

Indireto			
Emissor (cm)	Receptor (cm)	Leitura 1 (μ s)	Leitura 2 (μ s)
5	15	20,6	22
	25	46,7	49,5
	35	74	76
	45	103	104

Tabela 6.14 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 3.

Indireto			
Emissor (cm)	Receptor (cm)	Leitura 1 (μ s)	Leitura 2 (μ s)
5	15	26,9	22,5
	25	51,2	50
	35	84,3	78,2
	45	110,1	110

Tabela 6.15 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 4.

Indireto			
Emissor (cm)	Receptor (cm)	Leitura 1 (μ s)	Leitura 2 (μ s)
5	15	21	24,3
	25	47,5	49,8
	35	76,5	77,5
	45	100	103

Tabela 6.16 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 5.

Indireto				
Emissor (cm)	Receptor (cm)	Leitura 1 (μ s)	Leitura 2 (μ s)	Leitura 3 (μ s)
5	15	28,2	30	27,3
	25	55,3	55	56,8
	35	80,5	82,5	81,5
	45	106,5	105	109

Tabela 6.17 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 6.

Indireto				
Emissor (cm)	Receptor (cm)	Leitura 1 (μ s)	Leitura 2 (μ s)	Leitura 3 (μ s)
5	15	24,6	26,6	28,5
	25	50,5	57	57
	35	78,2	81	83,1
	45	103,5	103,5	109

Tabela 6.18 – Leitura do tempo de propagação da onda pelo modo de transmissão indireta – amostra 7.

Indireto			
Emissor (cm)	Receptor (cm)	Leitura 1 (μ s)	Leitura 2 (μ s)
5	15	24,1	24,5
	25	50,5	51
	35	74,8	78,5
	45	100,5	102