

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

**APLICAÇÃO DO ULTRA-SOM NA ESTIMATIVA DA
PROFUNDIDADE DE FENDAS SUPERFICIAIS E NA AVALIAÇÃO
DA EFICÁCIA DE INJEÇÕES EM ELEMENTOS DE
CONCRETO ARMADO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

ARTHUR MEDEIROS

Florianópolis
2007

**APLICAÇÃO DO ULTRA-SOM NA ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE
FENDAS SUPERFICIAIS E NA AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DE INJEÇÕES
EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO**

ARTHUR MEDEIROS

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Prof. Glicério Trichês – Coordenador do PPGEC

Prof. Ivo José Padaratz, PhD. - Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD. – ECV/UFSC

Prof. Dr. Wellington Longuini Repette – ECV/UFSC

À Deus

AGRADECIMENTOS

Ao professor Ivo José Padaratz, pela orientação dispensada, pela compreensão, paciência, amizade e permanente disponibilidade no transcorrer desta dissertação.

Aos meus pais Rui Medeiros e Suely Bruel Medeiros, pelo carinho, dedicação, apoio e confiança durante todo o decorrer deste trabalho, sem eles nada disso teria sido possível.

À amiga Vanessa Rheinheimer pela enorme amizade e grande companheirismo nos momentos de estudo, trabalho de laboratório, congressos, festas, e pelo freqüente incentivo em todas as etapas desta dissertação. Você foi um exemplo inspirador de dedicação ao mestrado.

Aos amigos Raphael Barp Garcia, Tatiane Pezente, Marco André Argenta e Adolfo Nallar pela amizade, companheirismo e colaboração nestes dois anos de estudos em Florianópolis dentro e fora da Universidade.

Ao professor Roberto C. A. Pinto pela amizade, colaboração e incentivo nas diversas etapas deste trabalho.

Aos membros do GPEND e amigos (Grupo de Pesquisa em Ensaios não Destrutivos) Murilo, Paulo, Thiago, Mario, Silvana, sem vocês não seria viável a realização do programa experimental feito por nós em laboratório.

Aos amigos Aline, Daniel e Denis do GTEC, pela freqüente ajuda no entendimento dos mistérios da concretagem e utilização dos equipamentos do LMCC.

À concreteira Polimix, especialmente à engenheira Leila e demais funcionários da concreteira, pela doação dos agregados, cimento, aditivo utilizados na confecção dos concretos.

À loja Matec, especialmente ao Eduardo, pela doação das resinas utilizadas neste trabalho e permanente disponibilidade na discussão sobre a utilização destas resinas.

À empresa Metal Porto, particularmente ao seu Antônio, pela ajuda na confecção de placas de alumínio e zinco utilizadas para induzir fendas superficiais.

Aos professores e bolsistas do GIEM, pela freqüente ajuda no suporte de material de escritório e ferramentas e paciência.

Aos funcionários do LMCC que entre broncas e desavenças nos ensinaram a utilizar a infra-estrutura e equipamentos.

Aos Professores Zücks e Narbal, pela ajuda e paciência, especialmente nos dias de concretagem no laboratório.

A todos os colegas de mestrado e professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

Ao faxineiro Emerson, pela atenção e companhia, nos longos dias de ensaios de ultra-som intermináveis.

Ao meu amigo Rafael Faria pelo auxílio na redação desta dissertação.

A minha amiga Rafaella Jacomel pelo companheirismo durante o ano que moramos juntos em Florianópolis.

Aos meus amigos, Clara e Giulia, Cris, Cynthia, Day, Leo, Pulga, Rodolfo entre muitos outros amigos pela eterna amizade mesmo a distância e visitas freqüentes.

Aos meus primos Ericson e Neto e ao meu amigo Joel, pelo freqüente suporte computacional em hardware e software.

Ao meu amigo João pelo constante suporte tecnológico que em muito facilitou a comunicação à distância.

Agradecimento aos professores Wellington Longuini Repette da UFSC e Luiz Carlos Pinto da Silva Filho da UFRGS pela participação na defesa e pelas sugestões e críticas que contribuíram para esta dissertação.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xviii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	1
1.2 Objetivo Geral	6
1.3 Objetivos Específicos	6
1.4 Delimitação da Pesquisa e Estrutura do Trabalho.....	7
2 ULTRA-SOM NO CONCRETO	8
2.1 Princípios Básicos da Propagação de Ondas	8
2.2 Método do Ultra-som	10
2.2.1 Descrição do Método.....	11
2.2.2 Geração e Recepção de Ondas Ultra-sônicas	13
2.2.3 Vantagens e Limitações.....	14
2.2.4 Variabilidade do Ensaio	14
2.3 Normalização.....	15
2.4 Fatores Intervenientes.....	19
2.4.1 Tipo, Composição Geológica, Tamanho e Granulometria do Agregado Graúdo	21
2.4.2 Tipo de Cimento	25
2.4.3 Aditivos	28
2.4.4 Relação Água/cimento.....	29
2.4.5 Grau de Compactação.....	30
2.4.6 Condições de Cura.....	31
2.4.7 Idade do Concreto.....	32
2.4.8 Condições de Superfície	34
2.4.9 Temperatura.....	35
2.4.10 Umidade	36

2.4.11	Distância Percorrida pela Onda Ultra-sônica, Tamanho e Forma da Peça e Comprimento de Onda	37
2.4.12	Estado de Tensões	39
2.4.13	Presença de Armaduras	39
2.4.13.1.	Barras Perpendiculares à Direção de Propagação	40
2.4.13.2.	Barras Paralelas à Direção de Propagação	42
2.5	Aplicações	46
2.5.1	Aplicação do Ultra-som para Avaliação das Propriedades Dinâmicas do Concreto.	47
2.5.2	Aplicação do Ultra-som para Avaliação da Qualidade do Concreto.....	49
2.5.2.1.	Detecção de Falhas de Concretagem.....	50
2.5.2.2.	Estimativa da Profundidade de Fissuras.....	53
3	TRATAMENTO DE FISSURAS.....	59
3.1	Introdução.....	59
3.2	Tipos de Fissuras	64
3.2.1	Fissuras Ativas.....	64
3.2.1.1.	Variação Térmica	65
3.2.1.2.	Retração por Secagem	65
3.2.1.3.	Cargas Dinâmicas	66
3.2.1.4.	Corrosão de Armadura, Reações Expansivas com Sulfatos e Reações Alkali-silicatos.....	66
3.2.2	Fissuras Passivas	67
3.2.2.1.	Assentamento Plástico.....	67
3.2.2.2.	Dessecação Superficial.....	69
3.2.2.3.	Retração Química	70
3.2.2.4.	Movimentação das Fôrmas.....	70
3.2.2.5.	Variação Térmica	71
3.2.2.6.	Sobrecargas.....	71
3.3	Reparo de Fissuras.....	72
3.3.1	Uso.....	75
3.3.2	Característica do material	75
3.3.3	Preparo da Superfície	76
3.3.4	Fixação de Bicos de Injeção e Selamento Superficial.....	76
3.3.5	Aplicação do Material de Reparo	76

3.3.6	Acabamento	77
3.3.7	Equipamento e Ferramental.....	77
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	80
4.1	Considerações Iniciais	80
4.2	Definição da Morfologia dos Moldes.....	81
4.3	Descrição do Equipamento de Ultra-som.....	85
4.4	Variáveis Intervenientes	86
4.4.1	Materiais Constituintes.....	86
4.4.2	Freqüência Natural dos Transdutores.....	86
4.4.3	Face de Leitura do Ensaio	87
4.4.4	Idades Para o Ensaio.....	88
4.4.5	Temperatura e Umidade Relativa.....	88
4.5	Materiais	88
4.5.1	Cimento	89
4.5.2	Agregados Graúdos	89
4.5.3	Agregados Miúdos.....	91
4.5.4	Aditivo.....	92
4.5.5	Barras de Aço	92
4.5.6	Água	93
4.6	Produção do Concreto	93
4.7	Descrição dos Ensaios	94
4.7.1	Obtenção da Velocidade de Propagação de Onda Ultra-sônica e Detecção das Fendas.....	95
4.7.2	Estimativa das Profundidades das Fendas.....	97
4.8	Preenchimento das Fendas	105
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	108
5.1	Série 1 – Detecção das Fendas Superficiais	108
5.2	Série 1 – Diferentes Profundidades de Fendas	111
5.3	Série 2 – Diferentes Aberturas de Fendas	124
5.4	Série 3 – Influência das Barras de Aço.....	138
5.5	Preenchimento das Fendas	147
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	155
6.1	Conclusões.....	155
6.2	Sugestão para Trabalhos Futuros.....	159

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160
ANEXO A	169
ANEXO B	171
ANEXO C	174

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de ondas geradas em um sólido: longitudinais, transversais e superficiais. Fonte: Filipczynski, Pawloswki e Wehr (1966).....	10
Figura 2.2 – Esquema de funcionamento do ultra-som. Fonte: ASTM C 597-02 (2003).	13
Figura 2.3 – Modos de transmissão segundo a NBR 8802 (1994).....	15
Figura 2.4 – Modo de transmissão indireto. Fonte: NBR 8802 (1994).....	17
Figura 2.5 – Determinação da velocidade pelo modo de transmissão indireto.....	17
Figura 2.6 – Correlação entre o ultra-som e a resistência à compressão, em concretos com diferentes tipos de agregados graúdos.	22
Figura 2.7 – Correlação entre a resistência à compressão e o ultra-som, em concretos com diferentes tipos de agregados graúdos.	23
Figura 2.8 – Efeito do proporcionamento da mistura na correlação entre velocidade de pulso e a resistência à compressão. Fonte: Sturup, Vecchio e Catarin (1984).....	23
Figura 2.9 – Efeito do tamanho máximo do agregado na correlação entre as velocidades de pulso e a resistência. Fonte: Sturup, Vecchio e Catarin (1984).....	24
Figura 2.10 – Efeito do tipo de cimento e aditivo na correlação entre a velocidade ultra-sônica e a resistência à compressão. Fonte: Sturup, Vecchio e Catarin (1984).	26
Figura 2.11 – Correlação entre a resistência à compressão em cubo (escala logarítmica) e a velocidade ultra-sônica. Fonte: Elvery e Ibrahim (1976) <i>apud</i> Hamassaki (1986)..	27
Figura 2.12 – Correlação entre a resistência à compressão e a velocidade ultra-sônica. Fonte Facaoaru (1961) <i>apud</i> Hamassaki (1986).	27
Figura 2.13 – Variação da velocidade com o tempo. Fonte: Almeida (1993).....	29
Figura 2.14 – Correlação entre a resistência à compressão e o ultra-som, em concretos com diferentes relações água/cimento. Fonte Facaoaru (1961) <i>apud</i> Hamassaki (1986).	30
Figura 2.15 –Relação entre velocidade de onda e idade. Fonte: Orchard (1978).....	32

Figura 2.16 – Influência da idade na evolução da velocidade de propagação para concretos com diferentes tipos e teores de cimento submetidos a diferentes temperaturas de cura. Fonte: Sturup, Vecchio e Catarin (1984).....	33
Figura 2.17 – Efeito da umidade na velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Fonte: Sturup, Vecchio e Catarin (1984).	36
Figura 2.18 – Leitura de ultra-som em concreto armado – barras perpendiculares à direção de propagação. Fonte RILEM NDT 1 (1972).....	41
Figura 2.19 – Leitura de ultra-som em concreto armado – barras paralelas à direção de propagação, modo de transmissão direto. Fonte: RILEM NDT 1 (1972).	42
Figura 2.20 – Leitura de ultra-som em concreto armado – barras paralelas à direção de propagação, modo de transmissão indireto. Fonte: RILEM NDT 1 (1972).....	43
Figura 2.21 - Ábaco: Fator de correção <i>versus</i> Diâmetro da barra - Barras paralelas ao percurso da onda. Fonte: Bunguey (1984).	45
Figura 2.22 - Ábaco: Fator de correção <i>versus</i> Diâmetro da barra - Barras perpendiculares ao percurso da onda. Fonte: Bunguey (1984).	46
Figura 2.23 – Esquema para determinação da menor dimensão de falhas internas do concreto. Fonte: Bauer (1987).....	50
Figura 2.24 - Ábaco para detecção de falhas internas de concretagem.....	52
Figura 2.25 – Esquema das leituras para detectar fissuras pelo modo de transmissão direto. Fonte: Knab, Blessing e Clifton (1983).	53
Figura 2.26 – Medida da profundidade de uma fissura. Fonte: Bunguey (1989).....	54
Figura 2.27 – Leitura de ultra-som ao redor de uma fissura inclinada.....	57
Figura 3.1 – Incidência relativa dos diferentes tipos de manifestações patológicas atendidas pelo CIENTEC. Fonte: Dal Molin (1988).....	60
Figura 3.2 – Incidência relativa dos diferentes tipos de manifestações patológicas na Bélgica entre 1976 e 1977.	60
Figura 3.3 – Lei de Evolução de custos.....	62
Figura 3.4 – Selo de gesso e alongâmetro para a verificação de movimentação de fissuras. Fonte: Repette (1991).....	63

Figura 3.5 – Fissurômetro: medida da abertura da fissura.	64
Figura 3.6 – Retração em função do tempo de concretos conservados em diferentes umidades relativas. Fonte: Troxell <i>et al</i> (1958) <i>apud</i> Neville (1997).	66
Figura 3.7 – Fissura pós assentamento plástico no concreto devido à restrição da armadura e do agregado graúdo. Adaptado de Padaratz (2005).	68
Figura 3.8 – Tipos de Fissuras. Fonte: CEB (1985).	69
Figura 3.9 – Fissuras no concreto devido ao deslocamento das fôrmas.	71
Figura 3.10 – Fissuras provocadas por esforços mecânicos de flexão pura, tração pura, constante (cisalhamento), torção e aderência. Fonte: CEB (1985).	72
Figura 3.11 – Injeção de Fissuras. Fonte: Quesada (2003).	78
Figura 4.1 – Procedimento para a indução das fendas superficiais nos moldes de concreto.	81
Figura 4.2 – Barra de aço embutidas no molde de concreto.	83
Figura 4.3 – Vistas laterais da Figura 4.2.	83
Figura 4.4 - Aparelho PUNDIT e barra de referência para calibração.	94
Figura 4.5 - Obtenção da velocidade indireta e detecção da fenda.	96
Figura 4.6 - Detecção da Fenda.	97
Figura 4.7 – Leituras de ultra-som equidistantes da fenda superficial.	98
Figura 4.8 – Malha de leituras de ultra-som dos moldes da Série 1.	99
Figura 4.9 – Molde 1f (h=22,0 cm; ω =3 mm).	100
Figura 4.10 – Caminhamento do transdutor receptor nos dois sentidos.	101
Figura 4.11 – Malha de leituras de ultra-som dos moldes da Série 2.	101
Figura 4.12 – Molde 2b1 (h=10,0 cm; ω =6 mm).	102
Figura 4.13 – Malha de leituras de ultra-som nos moldes da Série 3.	103
Figura 4.14 – Molde 3b (h=10,0 cm; ω =6 mm; ϕ =12,5 mm).	104
Figura 4.15 – Molde 3b (h=10,0 cm; ω =6 mm; ϕ =12,5 mm).	104
Figura 4.16 – Preenchimento parcial das fendas.	106

Figura 5.1- Detecção de Fendas.	109
Figura 5.2 - Vista 3D do molde 1e.	110
Figura 5.3 - Vistas da Figura 5.2.	111
Figura 5.4 – Detecção de fenda para o molde 2a3 (h=7,5 cm; ω =6 mm),	148
Figura 5.5 – Detecção de fenda para o molde 2b3 (h=10,0 cm; ω =6 mm),	148
Figura 5.6 – Corte do molde 2a3 (h=7,5 cm; ω =6 mm).	149
Figura 5.7 – Corte do molde 2f (h=15,0 cm; ω =0,5 mm).	150
Figura 5.8 – Corte do molde 2f (h=15,0 cm; ω =0,5 mm).	151
Figura 5.9 – Corte do molde 2a2 (h=7,5 cm; ω =6 mm). Preenchimento superficial de 2,5cm com resina epóxi fluida.....	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Classificação de aberturas em concreto. Fonte: Padaratz (2005).	5
Tabela 2.1 – Classificação das ondas sonoras de acordo com a frequência.	8
Tabela 2.2 – Classificação relacionando velocidade à qualidade do concreto. Fonte: Whitehurst (1966) e Rincon <i>et al</i> (1998).	9
Tabela 2.3 – Normas para determinação da velocidade de onda ultra-sônica no concreto. Fonte: Komlos <i>et al</i> (1996).	19
Tabela 2.4 – Intervalos de velocidade de ondas ultra-sônicas para alguns tipos de rocha. Fonte: Chung e Law (1983).	21
Tabela 2.5 – Correções para velocidade de propagação de onda ultra-sônica devido a variações de temperatura. Fonte: RILEM NDT 1 (1972).	35
Tabela 2.6 – Fatores de correção dos valores de V_e – Eixo da Barra Perpendicular ao percurso da onda ultra-sônica. Fonte RILEM NDT 1 (1972).	42
Tabela 2.7 – Fatores de correção dos valores de V_e – Eixo da barra paralelo ao percurso da onda ultra-sônica. Fonte: RILEM NDT 1 (1972).	44
Tabela 2.8 – Relação empírica entre os módulos de deformação dinâmico e estático e a velocidade ultra-sônica. Fonte: BS 1881: Part 203 (1986).	48
Tabela 3.1 – Distribuição de manifestações patológicas encontradas em pesquisa realizada pelo IPT. Fonte: Ioshimoto (1985).	59
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).	62
Tabela 3.3 – Viscosidade recomendada para diferentes aberturas das fissuras.	74
Tabela 4.1 – Séries de moldes do programa experimental.	84
Tabela 4.2 – Resistência à compressão de cada uma das três séries (MPa).	84
Tabela 4.3 – Análise física e química do cimento CPIV-RS.	89
Tabela 4.4 – Caracterização da brita 0 (pedrisco).	90

Tabela 4.5 – Caracterização da brita 1.	90
Tabela 4.6 – Caracterização da areia fina.....	91
Tabela 4.7 – Caracterização da areia artificial.	92
Tabela 4.8 – Composição por metro cúbico de concreto.	93
Tabela 5.1 – Resultados de velocidade indireta para diferentes idades, Série 1.	112
Tabela 5.2 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 1a ($h=2,5$ cm; $\omega=3$ mm).	115
Tabela 5.3 – Profundidades calculadas “ h ” (cm), para o molde 1a ($h=2,5$ cm; $\omega=3$ mm).	115
Tabela 5.4 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 1b ($h=5,0$ cm; $\omega=3$ mm).	116
Tabela 5.5 – Profundidades calculadas “ h ” (cm), para o molde 1b ($h=5,0$ cm; $\omega=3$ mm).	116
Tabela 5.6 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 1c ($h=7,5$ cm; $\omega=3$ mm).	117
Tabela 5.7 – Profundidades calculadas “ h ” (cm), para o molde 1c ($h=7,5$ cm; $\omega=3$ mm).	117
Tabela 5.8 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 1d ($h=10,0$ cm; $\omega=3$ mm).	118
Tabela 5.9 – Profundidades calculadas “ h ” (cm), para o molde 1d ($h=10,0$ cm; $\omega=3$ mm).	118
Tabela 5.10 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 1e ($h=15,0$ cm; $\omega=3$ mm).	119
Tabela 5.11 – Profundidades calculadas “ h ” (cm), para o molde 1e ($h=15,0$ cm; $\omega=3$ mm).	119
Tabela 5.12 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 1f ($h=22,0$ cm; $\omega=3$ mm).	120
Tabela 5.13 – Profundidades calculadas “ h ” (cm), para o molde 1f ($h=22,0$ cm; $\omega=3$ mm).	120

Tabela 5.14 – Valores “ b ” e “ a ” utilizados nas combinações de tempos para o Modelo 2.	125
Tabela 5.15 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs),	126
Tabela 5.16 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1,	126
Tabela 5.17 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2,	127
Tabela 5.18 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs),	127
Tabela 5.19 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1,	128
Tabela 5.20 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2,	128
Tabela 5.21 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 2c ($h=5,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).	131
Tabela 5.22 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1,	131
Tabela 5.23 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2,	131
Tabela 5.24 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 2d ($h=7,5$ cm; $\omega=0,5$ mm).	132
Tabela 5.25 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1,	132
Tabela 5.26 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2,	132
Tabela 5.27 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 2e ($h=10,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).	133
Tabela 5.28 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1,	133
Tabela 5.29 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2,	133
Tabela 5.30 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 2f ($h=15,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).	134
Tabela 5.31 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1,	134
Tabela 5.32 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2,	134
Tabela 5.33 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 2g ($h=5,0$ cm; $\omega=25$ mm).	136
Tabela 5.34 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelos Modelos 1 e 2,	136

Tabela 5.35 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 2h ($h=7,5$ cm; $\omega=25$ mm).	137
Tabela 5.36 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelos Modelos 1 e 2,	137
Tabela 5.37 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 3a.....	139
Tabela 5.38 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1,	139
Tabela 5.39 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2,	140
Tabela 5.40 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs),	140
Tabela 5.41 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1,	141
Tabela 5.42 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2,	141
Tabela 5.43 – Tempos de propagação “ T_f ” em (μs),	142
Tabela 5.44 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1,	142
Tabela 5.45 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2,	143
Tabela 5.46 – Profundidades calculadas “ h ” para os moldes 2a1 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm), 2b4 ($h=10,0$ cm; $\omega=6$ mm), 1e ($h=15,0$ cm; $\omega=3$ mm) e 1f ($h=22,0$ cm; $\omega=3$ mm)	146
Tabela 5.47 – Tempos de propagação “ T_f ” antes e depois do preenchimento com resina epóxi, para os moldes 2a3, 2b3 e 2f.	150
Tabela 5.48 – Tempos de propagação “ T_f ” antes e depois do preenchimento com resina epóxi, para os moldes 2a2 e 2a4 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm).	152
Tabela 5.49 – Tempos de propagação “ T_f ” antes e depois do preenchimento com argamassa pobre e espuma de poliuretano, para o molde 2h ($h=7,5$ cm; $\omega=25$ mm)...	153
Tabela 5.50 – Tempos de propagação “ T_f ” antes e depois do preenchimento com água, para o molde 2h ($h=7,5$ cm; $\omega=25$ mm) e profundidades calculadas “ h ”.	154

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>EN-ISO</i>	European Committee for Standardization
<i>PUNDIT</i>	Portable Ultrasonic Non Destructive Indicating Tester
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>RILEM</i>	Réunion Internationale dès Laborattories d'Éssais et dès Recherches sur lês Matériaux et les Constructions
<i>NM</i>	Norma Mercosul

RESUMO

Técnicas não destrutivas baseadas na propagação de ondas de ultra-som vêm sendo cada vez mais utilizadas para avaliação da homogeneidade do concreto em peças estruturais. Falhas de concretagem não visíveis externamente, por exemplo, podem ser detectadas com a utilização do ultra-som, assim como danos causados por incêndio ou por ciclos de gelo e degelo. O tempo de propagação da onda de ultra-som ao longo das regiões de falhas é superior ao tempo de propagação ao longo do concreto íntegro, e, como consequência, há uma diminuição da velocidade de propagação da onda, nestas situações. Pode-se também utilizar o ultra-som na detecção de fissuras, trincas ou fendas superficiais em elementos estruturais de concreto. O ultra-som, através do modo de transmissão indireto, permite avaliar a localização e estimar a profundidade destas fissuras, trincas ou fendas.

Neste trabalho foi estudada detalhadamente esta aplicação do ultra-som, avaliando a capacidade de detecção de fendas superficiais, a estimativa de suas profundidades e a verificação da eficácia de injeções para o preenchimento das mesmas. Para tanto, foi conduzido um programa experimental com a utilização de corpos-de-prova de concreto confeccionados em laboratório com fendas verticais de configurações previamente conhecidas. Inicialmente procurou-se estimar a profundidade destas fendas para diferentes aberturas e profundidades, posteriormente estas foram preenchidas com diferentes resinas de mercado para reparo de estruturas com base epóxi e utilizou-se o ultra-som para verificar se as fendas foram preenchidas por completo.

Foi estudada a influência de variáveis como a idade e a presença de barras de aço imersas no concreto, variáveis estas que podem influenciar significativamente os resultados de velocidade de propagação de onda ultrasônica.

A técnica apresentada mostrou-se eficaz na detecção de fendas superficiais, estimativa de suas profundidades, mas nem tanto na verificação do preenchimento com materiais de mercado. Foram discutidas limitações da técnica para a estimativa da profundidade de fendas, a fim de tornar mais clara a aplicação prática do ultra-som na avaliação de fendas superficiais.

Este trabalho deverá contribuir para um melhor entendimento, além de proporcionar uma utilização mais ampla, da técnica não destrutiva de ultra-som na avaliação da homogeneidade do concreto e serviços de reparo em elementos estruturais.

ABSTRACT

Non destructive techniques based on ultrasound propagation velocity (UPV) have been used to assess concrete homogeneity in structural members. In the presence of internal concrete flaws, as fire damage or cycles of freezing and thawing, the pulse time propagation is greater than the time propagation through sound concrete, reducing the pulse velocity. It is also possible to use the ultrasound method to detect surface cracks in structural members. Using the indirect transmission method the ultrasound may locate cracks and estimate its depths.

The main proposal of this work is to study the capability of UPV in detecting surface cracks, estimating its depths and also the efficacy of crack filling by injection. This work in general studies the detection of cracks in concrete by the UPV method. Firstly concrete specimens with known vertical induced cracks were molded. Then using the UPV indirect method tests were carried out to estimate different crack depth and different openings. Afterwards, the cracks were filled with epoxy resin and the tests repeated in order to confirm whether the cracks were fulfilled. This work shall contribute for a better understanding, also for a wider use, of the UPV in evaluating the concrete homogeneity and repair services in structural members.

It was studied the influence of time and the presence of reinforcement in the capability of UPV estimate crack depths.

The technique was successful in detecting surface cracks and estimating crack depths, but not to much in confirm whether the cracks were fulfilled. Some of the limitations of this technique use were discussed.

This work shall contribute for a better understanding, also for a wider use, of the UPV in evaluating the concrete homogeneity and repair services in structural members.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

O concreto teve seu uso amplamente difundido no último século em construções de pequeno, médio e grande porte tais como residências, edifícios, pavimentos, estruturas de contenção, fundações entre outras. Pode-se dizer que o concreto é o material mais utilizado em construção. Segundo Brunauer e Copeland (1964) *apud* Metha e Monteiro (2000), “o homem não consome nenhum outro material em tal quantidade, a não se a água”.

Tal preferência pelo concreto deve-se, principalmente, ao seu baixo custo, à economia de energia no seu processo de mistura e moldagem e aos benefícios ecológicos advindos do aproveitamento de resíduos industriais em substituição ao material cimentante ou agregados. Além disso, o concreto é um material resistente à água, proporciona facilidade de execução de elementos estruturais com variedade de formas e tamanhos e seus ingredientes (cimento Portland e agregados) encontram-se disponíveis na maior parte do mundo (METHA e MONTEIRO, 2000).

Porém, o mesmo descaso que tem com a água, acreditando que esta seja eterna, o homem tem com suas construções. Simplesmente utiliza, sem qualquer preocupação com manutenção, considerando-as eternas.

A maioria das estruturas de concreto como edifícios, túneis, pontes, entre outras, são construídas em estágios sucessivos, onde as diversas partes (sapatas, vigas, lajes e pilares) são executadas em diferentes etapas, de forma que muitas vezes determinados elementos que já foram concretados, serão a própria restrição à retração dos outros elementos adjacentes. Os elementos espessos de concreto diretamente apoiados em rocha, têm sua base restringida, funcionando como um engaste natural para o elemento estrutural. Estas situações podem apresentar um quadro de fissuração (BORGES, 2002).

Estando a estrutura calculada e construída corretamente, seguindo normas e procedimentos construtivos, as alterações produzidas por fatores internos e muitas das produzidas por fatores externos, não chegam a comprometer a sua segurança. No entanto, existem problemas como incêndios, sobrecargas não previstas, recalques diferenciados do terreno, reações químicas entre os agregados e o cimento que não são previstas no projeto e que podem levar a estrutura a um estado de fissuração, muitas vezes fatal a ela. (FIGUEREDO 1989).

De acordo com Silva *et al* (2005), pode-se dizer que a fissuração em elementos estruturais de concreto é praticamente inevitável, devido à grande variabilidade e à baixa resistência do concreto à tração. Para impedir este fenômeno, seria necessário adotar seções transversais de dimensões exageradas, o que se torna economicamente inviável ou utilizar concreto protendido, nem sempre viável, além de requerer mão de obra especializada.

As fissuras no concreto podem ocorrer por diferentes causas, afetando somente a aparência, ou indicando dano estrutural significativo ou perda de durabilidade. As fissuras podem representar a extensão total dos danos, ou apontar problemas de maior magnitude. Seu significado depende do tipo de estrutura, assim como da natureza da fissuração. Por exemplo, as fissuras que são aceitáveis em edifícios talvez não sejam aceitáveis em estruturas de contenção (ISSA e DEBS, 2005).

Tendo em vista que o aparecimento de fissuras em estruturas de concreto pode ser prejudicial à durabilidade e à segurança, torna-se necessário inspecionar e averiguar as reais condições destas estruturas. Essas avaliações podem ser realizadas utilizando-se ensaios destrutivos, parcialmente destrutivos e não-destrutivos.

Os ensaios destrutivos, como o próprio nome diz, são aqueles que danificam a estrutura na realização do ensaio. Um modo destrutivo de avaliar fissuras seria a retirada de testemunhos onde fosse possível visualizar a extensão das mesmas. Tal ensaio apresenta as desvantagens de ser oneroso e da restrição dos locais de retirada das amostras, para que não se comprometa a estabilidade da estrutura em análise.

Os ensaios parcialmente destrutivos são aqueles que causam somente danos superficiais, onde os prejuízos são apenas estéticos.

Os ensaios não-destrutivos têm a capacidade de verificar a qualidade de uma estrutura ou elemento de concreto sem ocasionar dano à estrutura em questão.

Dentre os ensaios não-destrutivos, aplicáveis ao concreto, Carino (1994) enumera os seguintes: Auscultação; Emissão acústica; Esclerometria; Ensaios de arrancamento; Ensaio de fratura interna; Ensaio de penetração de pinos; Ensaio de aderência; Ensaio de torque Stoll; Fibras óticas; Inspeção visual; Método da maturidade; Métodos magnéticos e elétricos; Métodos nucleares; Penetrabilidade; Propagação de ondas-tensão; Radar de sub-superfície; Termografia infravermelha e Ultra-som.

No Brasil os ensaios não-destrutivos mais difundidos são: ultra-som e esclerometria.

De acordo com a BS 1881: Part 201 (1986), os ensaios não-destrutivos são convenientes para, entre outras alternativas:

- Controle tecnológico em elementos de concreto pré-moldados ou construções *in situ*;
- Aceitação, ou não, de materiais fornecidos;
- Esclarecimento de dúvidas a respeito da mão-de-obra envolvida em mistura, lançamento, transporte, compactação ou cura do concreto;
- Monitoramento do desenvolvimento da resistência visando remoção de fôrmas, duração da cura, aplicação de protensão ou de cargas, remoção de escoramento;
- Localização e determinação da extensão de fissuras, vazios e falhas de concretagem;
- Determinação da posição, diâmetro ou condições das armaduras;
- Determinação da uniformidade do concreto;

- Aumento do nível de confiança de um pequeno número de ensaios destrutivos;
- Verificar a deterioração do concreto resultante de sobrecarga, fadiga, fogo e ataque do meio ambiente;
- Avaliação do potencial de durabilidade do concreto;
- Monitoramento de mudanças das propriedades do concreto ao longo do tempo;
- Fornecimento de informações para que se verifique se é possível mudar a utilização de uma estrutura.

Pode-se estimar o dano que uma fissura causa em uma estrutura de concreto através de inspeção visual, pela abertura da mesma na superfície. Entretanto, não é possível avaliar visualmente a extensão de uma fissura quanto à sua profundidade. Para tal, em teoria, pode-se recorrer ao ensaio de ultra-som, para procurar avaliar a profundidade de fissuras.

Procedimentos para a avaliação de fissuras superficiais em elementos de concreto através do ensaio de ultra-som são descritos na literatura (RILEM, NDT1, 1972; BS 1881 Part 203, 1986; BUNGEY, 1989; EN-ISO 8047, 1994; PUNDIT MANUAL, 1994; ROSSEL *et al*, 2000; NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004), porém não há grande volume de dados disponíveis sobre a utilização prática dos mesmos.

O presente trabalho pretende utilizar estes procedimentos teóricos para a detecção e definição da geometria (profundidade) de fissuras superficiais induzidas na prática e discutir sua aplicabilidade.

Foram moldados em laboratório 23 prismas de concreto com falhas induzidas conhecidas, simulando uma fissura, onde foram realizados ensaios de ultra-som buscando avaliar a geometria destas falhas. Cada prisma teve uma falha induzida com diferente geometria (abertura e/ou profundidade). Dependendo da abertura superficial desta falha, esta pode ter diferentes denominações como mostra a Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Classificação de aberturas em concreto. 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

Entendendo que uma fissura em concreto é uma abertura de geometria complexa, neste trabalho optou-se por utilizar o termo **fenda** para falhas superficiais induzidas, mesmo que a abertura superficial não coincida com a descrição da Tabela 1.1. Assim sendo, quando se ler fenda, entenda-se como falha superficial induzida, de geometria controlada nos moldes de concreto confeccionados em laboratório para o programa experimental deste trabalho. Quando se ler fissura, entenda-se abertura superficial ou interna em concreto, de geometria não controlada.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar em que condições o método de propagação de ondas ultra-sônicas em concretos é capaz de estimar a profundidade de aberturas superficiais, como fissuras, trincas e fendas, e verificando adicionalmente se serve como instrumento de apoio para controle de técnicas de injeção de resinas empregadas para reparo destas aberturas.

1.3 Objetivos Específicos

- Verificar a sensibilidade do método do ultra-som em detectar fendas superficiais induzidas em concreto através do modo de transmissão indireto;
- Estudar as limitações, do aparelho de ultra-som disponível, para estimar diferentes profundidades de fendas superficiais induzidas;
- Verificar a profundidade mínima de fendas superficiais induzidas que a técnica consegue estimar;
- Avaliar a abertura mínima de fendas superficiais induzidas nas quais seja possível estimar a profundidade;
- Descobrir se existe diferenças nas estimativas de profundidades de fendas superficiais induzidas nas primeiras idades do concreto;
- Estudar a influência da presença de barras de aço no concreto próximas às fendas nos casos supracitados;
- Avaliar a sensibilidade da técnica em verificar serviços de injeção para reparo de fissuras, trincas e fendas.

1.4 Delimitação da Pesquisa e Estrutura do Trabalho

Para cumprir os objetivos deste trabalho, procurou-se limitar o estudo apenas a moldes de concreto confeccionados em laboratório com fendas perpendiculares à superfície de diferentes geometrias (aberturas e profundidades) conhecidas. Sem esta avaliação, torna-se difícil prever se é possível utilizar a técnica para estimar fissuras, trincas e fendas de geometria irregular freqüentes em estruturas *in loco*.

O trabalho foi dividido em seis capítulos, iniciando-se pela revisão bibliográfica existente sobre os assuntos relevantes aos objetivos gerais, passando ao programa experimental desenvolvido, apresentação e análise dos resultados e considerações finais.

O Capítulo 1, no qual se encontra este item, faz uma breve introdução do tema, justificando sua relevância.

Os Capítulos 2 e 3 apresentam a revisão bibliográfica referente ao método do ultra-som para concreto e a classificação de fissuras em concreto, bem como as técnicas utilizadas para tratá-las.

O Capítulo 4 detalha os procedimentos e ensaios adotados no programa experimental, através da descrição de como os moldes foram confeccionados com fendas superficiais induzidas e o detalhamento dos métodos utilizados para avaliar as fendas superficiais.

No Capítulo 5, foram utilizados modelos matemáticos propostos na literatura para a estimativa de profundidade das diferentes fendas superficiais induzidas. Foram obtidos resultados para dois modelos matemáticos diferentes e discutida a aplicabilidade de cada um deles.

No Capítulo 6, encontram-se as principais conclusões alcançadas neste trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros.

2 ULTRA-SOM NO CONCRETO

2.1 Princípios Básicos da Propagação de Ondas

Onda é uma perturbação que se propaga, de um ponto para outro, através de um meio, transmitindo energia sem transporte de matéria. Quanto à sua natureza, as ondas podem ser classificadas em:

- Eletromagnéticas: originárias de perturbações em campos elétricos e magnéticos, e que podem se propagar em meios materiais e no vácuo (SEARS, ZEMANSKY e YOUNG,1994);
- Mecânicas: necessitam de um meio material para se propagar. Neste caso enquadram-se as ondas sonoras, que se originam por uma perturbação em meio material sólido, líquido ou gasoso (SEARS, ZEMANSKY e YOUNG,1993).

Segundo Alba (1989) *apud* Repette (1991), as ondas acústicas são classificadas de acordo com suas frequências em:

- Sub-sônicas: com frequências de até 16 Hz;
- Sônicas: com frequências de 16 Hz a 20 kHz, sendo esta a faixa de som audível;
- Ultra-sônicas: com frequência de 20 kHz a até 1000 MHz.

A Tabela 2.1 ilustra a classificação das ondas sonoras.

Tabela 2.1 – Classificação das ondas sonoras de acordo com a frequência.
Fonte: Alba (1989) *apud* Repette (1991).

ONDAS SUB-SÔNICAS	ONDAS SÔNICAS	ONDAS ULTRA-SÔNICAS
	SOM AUDÍVEL	
	16 Hz	20 kHz

A velocidade do som depende, entre outros fatores, do meio de propagação. Verifica-se que a velocidade do som nos sólidos é maior que nos líquidos, que por sua vez é maior que a velocidade do som nos gases. Desta forma:

$$V_{som_{sólidos}} > V_{som_{líquidos}} > V_{som_{gases}}$$

Essa observação é muito importante no entendimento e análise dos resultados dos ensaios de determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica em diferentes concretos. A Tabela 2.2 mostra uma classificação que relaciona intervalos de velocidades de propagação de ondas ultra-sônicas à qualidade do concreto.

Tabela 2.2 – Classificação relacionando velocidade à qualidade do concreto. Fonte: Whitehurst (1966) e Rincon *et al* (1998).

Velocidade da Onda Ultra-sônica (m/s)	Qualidade do Concreto
V > 4500	EXCELENTE
3500 < V < 4500	ÓTIMO
3000 < V < 3500	BOM
2000 < V < 3000	REGULAR
V < 2000	RUIM

Quando impulsos mecânicos são aplicados a materiais sólidos, três tipos de ondas são geradas. Um movimento específico das partículas no meio de transmissão ocorre em cada tipo. Os tipos de onda são geralmente conhecidos como longitudinal (também chamadas de ondas de compressão), transversal (também chamadas de ondas de cisalhamento) e de superfície (também chamadas ondas *Rayleigh*) (NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004).

As ondas longitudinais propagam-se através de um meio sólido de maneira análoga à propagação de ondas sonoras no ar. Cada tipo de onda tem sua velocidade característica. Para um dado sólido, como o concreto, ondas longitudinais têm maiores velocidades e ondas de superfície têm menores velocidades. No concreto, as velocidades de ondas transversais e de superfície

correspondem a 60% e 55%, respectivamente, da velocidade de ondas longitudinais (BUNGEY, 1989).

De acordo com Bungey (1989) a diferença entre as ondas se dá pelo tipo de movimento provocado nas partículas. As ondas longitudinais são aquelas em que o deslocamento das partículas ocorre na mesma direção em que se propagam. Nas ondas transversais o percurso da onda é perpendicular ao movimento das partículas. Enquanto que as ondas superficiais têm as partículas se deslocando elipticamente ao longo da superfície da peça. A Figura 2.1 mostra um esquema dos diferentes tipos de ondas geradas em um meio sólido.

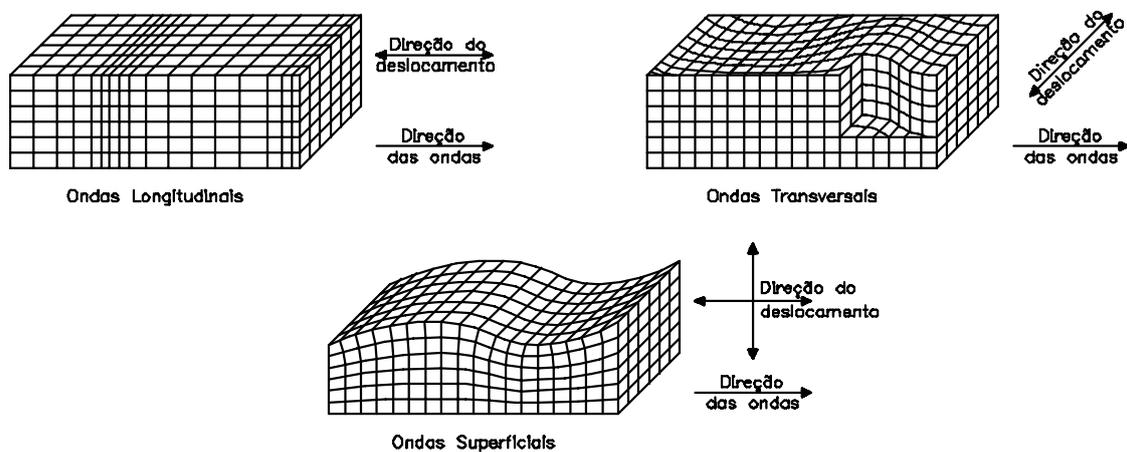


Figura 2.1 – Tipos de ondas geradas em um sólido: longitudinais, transversais e superficiais. Fonte: Filipczynski, Pawloski e Wehr (1966).

Os transdutores dos aparelhos de ultra-som são projetados em geral para gerar ondas longitudinais, entretanto também são geradas algumas ondas transversais e de superfície, mas estas não chegam a causar interferência considerável nos ensaios. Por serem as mais rápidas, apenas as ondas longitudinais são captadas pelo transdutor receptor (BUNGEY, 1989).

2.2 Método do Ultra-som

O desenvolvimento do método da propagação de ondas ultra-sônicas em concreto iniciou-se na década de 40, simultaneamente, com Leslie e

Cheesman no Canadá, com um instrumento chamado Soniscópio, e com Jones na Inglaterra, desenvolvendo o UCT (*Ultrasonic Concrete Tester*). Pode-se considerar que as diferenças nos princípios de funcionamento destes aparelhos estavam na frequência de ressonância dos transdutores. No UCT, essas frequências eram da ordem de 150 kHz, gerando limitações quanto à distância de trabalho entre os transdutores em 2 metros. No Soniscópio, as frequências eram da ordem de 20 kHz, o que possibilitava executar leituras em peças de concreto bem mais extensas. No entanto, a necessidade do acoplamento de um mostrador digital externo para leitura das medidas dificultava a aplicação do método em inspeções para avaliação de estruturas de concreto (HAMASSAKI, 1986).

Somente no início dos anos 70, com o surgimento do PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester*), viabilizou-se a utilização do ultra-som em estruturas de concreto, por tratar-se de aparelho portátil, de pouco peso, bateria própria e com a apresentação do tempo de propagação da onda ultra-sônica em mostrador digital. Por utilizar frequências próximas de 50 kHz, o PUNDIT pode ser utilizado em peças de concreto com comprimento de até 20 metros, aproximadamente (HAMASSAKI, 1986; REPETTE, 1991; MENEGHETTI, 1999).

2.2.1 Descrição do Método

A velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas percorrendo um material sólido, homogêneo, isotrópico em meio infinito depende da densidade e das propriedades elásticas desse material, conforme Equação 2.1 (BUNGEY, 1989; PUNDIT MANUAL, 1994; NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004).

$$V = \sqrt{\frac{KE_d}{\rho}} \quad (2.1)$$

Com:

$$K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.2)$$

Onde:

V = velocidade de propagação de onda ultra-sônica, m/s;

E_d = módulo de elasticidade dinâmico, N/m² ou Pa;

ρ = densidade, kg/m³;

ν = coeficiente de Poisson dinâmico.

Este método é baseado no princípio de que a velocidade depende somente das propriedades do material, sendo assim, a medição desta velocidade permite uma avaliação das condições do material testado (PUNDIT MANUAL, 1994).

O ensaio consiste na medição, por meio eletrônico, do tempo de propagação de ondas ultra-sônicas através do concreto, entre o emissor e o receptor. O comprimento percorrido entre os transdutores dividido pelo tempo de propagação, resulta na velocidade média de propagação da onda ultra-sônica conforme a Equação 2.3 (NBR 8802, 1994; NM 58, 1996).

$$V = \frac{L}{t} \quad (2.3)$$

Onde:

L = distância entre transdutores (m);

t = tempo de percurso das ondas (s).

2.2.2 Geração e Recepção de Ondas Ultra-sônicas

As ondas ultra-sônicas são geradas por um transdutor eletroacústico que, ligado a um circuito eletrônico, recebe um estímulo para oscilar mecanicamente, em uma frequência que pode ser de 20 até 1000 kHz dependendo do transdutor. Este transdutor eletroacústico é formado por materiais cristalinos de efeito piezoelétrico. O circuito eletrônico emite pequenos pulsos elétricos ao transdutor, excitando o cristal na sua frequência natural. Esta vibração gera ondas ultra-sônicas capazes de atravessar o material em estudo (BUNGEY, 1989; ASTM C 597-02, 2003).

O equipamento que realiza este teste é composto por um circuito eletrônico capaz de gerar os pulsos, que são transformados em ondas ultra-sônicas e transmitidas para o concreto, recebidas por um transdutor-receptor, amplificadas e transformadas em pulsos elétricos novamente, permitindo que se meça o tempo de propagação. Este circuito básico de funcionamento é apresentado na Figura 2.2.

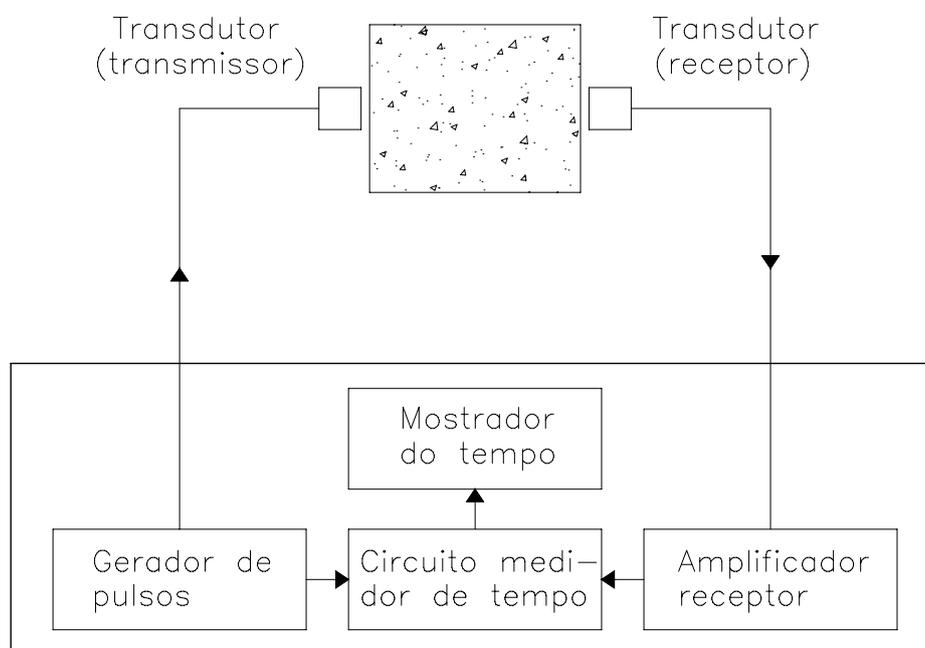


Figura 2.2 – Esquema de funcionamento do ultra-som. Fonte: ASTM C 597-02 (2003).

2.2.3 Vantagens e Limitações

O equipamento para ensaio de ultra-som é de fácil operação e custo não muito elevado. O ensaio é completamente não-destrutivo, permitindo inúmeras avaliações no concreto, sem afetar a utilidade e durabilidade da estrutura. O método tem, sobre outros ensaios não-destrutivos, a vantagem de não se limitar a uma avaliação superficial das características do concreto, estendendo-se a toda sua massa (CÁNOVAS, 1988; PHOON, WEE e LOI, 1999). Entretanto a interpretação dos resultados requer pessoal experiente, pois podem ser feitas conclusões erradas no caso de não se levar em conta os diversos fatores que influenciam a velocidade de propagação de onda ultra-sônica no concreto.

O ponto crítico do ensaio de ultra-som, segundo Naik, Malhotra e Popovics (2004), é garantir um perfeito contato entre os transdutores e o concreto. Caso este contato seja inadequado, pode-se criar um bolsão de ar entre os transdutores e o concreto, que acarretará em erro na determinação do tempo de propagação da onda ultra-sônica. Este erro ocorre porque somente uma parcela insignificante do pulso pode ser transmitida ao ar.

Para assegurar o perfeito contato, recomenda-se a utilização de algum tipo de gel de alta viscosidade, por exemplo vaselina ou graxa, aplicada em finas camadas entre o transdutor e o concreto (NBR 8802, 1994).

2.2.4 Variabilidade do Ensaio

Vários estudos demonstraram que a avaliação da homogeneidade do concreto em construções, é viável, com a utilização do ultra-som. Tomsett (1980) julga que a homogeneidade do concreto pode ser avaliada através do coeficiente de variação das velocidades de propagação de ondas ultra-sônicas. A variabilidade do ensaio de acordo com o mesmo, é de apenas 1,5%, para uma unidade de concreto com um só tipo de resistência à compressão.

Os estudos realizados por Knab, Blessing e Clifton (1983) constataam que a variação das velocidades de propagação de onda ultra-sônica no concreto foram maiores do que a variabilidade intrínseca da repetição dos ensaios.

Bungey (1989) mostra um estudo em duas vigas de concreto armado e obtém coeficientes de variação ao longo da viga de 2,5% para uma e 4,8% para a outra viga. Para a avaliação de uma estrutura completa, o autor sugere que o coeficiente de variação deve ficar entre 6 e 9%.

Naik, Malhotra e Popovics (2004) citam que para ensaios realizados em laboratório, o coeficiente de variação deverá ser da ordem de 2%.

2.3 Normalização

No Brasil a NBR 8802 (1994) prescreve o método de ensaio não-destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultra-sônicos, através de um componente de concreto. Esta norma indica três modos possíveis de transmissão, de acordo com o posicionamento dos transdutores, conforme a Figura 2.3.

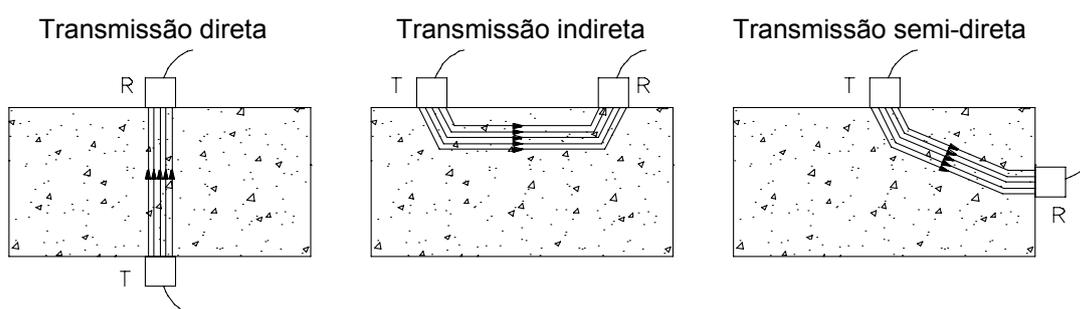


Figura 2.3 – Modos de transmissão segundo a NBR 8802 (1994).

- Transmissão direta, com transdutores em faces opostas;
- Transmissão indireta, com transdutores na mesma face;
- Transmissão semi-direta, com transdutores em faces adjacentes.

O modo de transmissão direta é o mais satisfatório, pois é neste que a máxima energia é transmitida. Este modo é bastante utilizado para correlação com resistência à compressão, obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, porém necessita de duas faces 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 pretende 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.

O pulso recebido no modo indireto depende da sua dispersão nas descontinuidades do concreto e isto pode gerar erros na obtenção da velocidade de propagação da onda ultra-sônica. A velocidade depende predominantemente da região superficial do concreto, que pode não ser representativa do elemento como um todo, além do que o comprimento percorrido pelo pulso é incerto (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-emissor e caminhar o transdutor-receptor pelo concreto por distâncias pré-definidas fazendo leituras sucessivas, conforme a Figura 2.4. Destas leituras se plota um gráfico de Tempo de Propagação *versus* Distância marcando os pontos para cada distância lida, conforme a Figura 2.5. A partir destes pontos é traçada

uma reta que melhor se ajuste a eles. A inclinação desta reta é a velocidade da onda ultra-sônica, pelo modo de transmissão indireto.

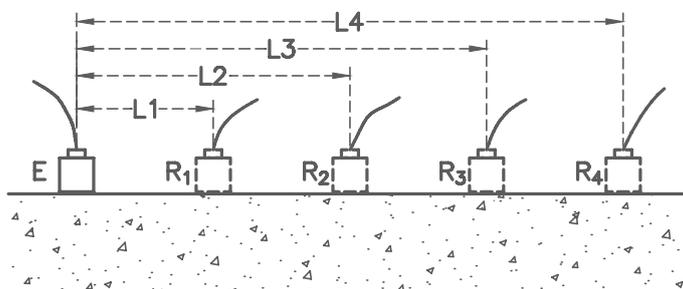


Figura 2.4 – Modo de transmissão indireto. Fonte: NBR 8802 (1994).

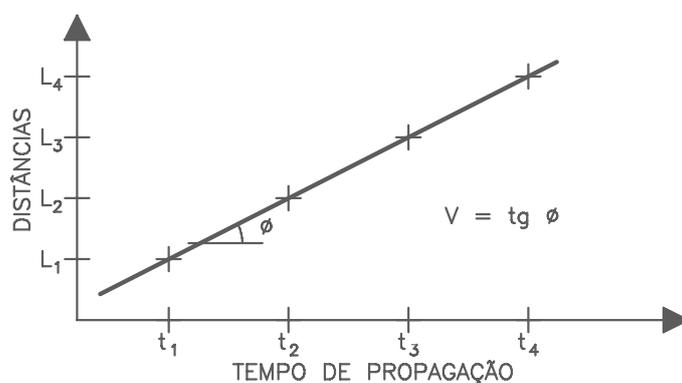


Figura 2.5 – Determinação da velocidade pelo modo de transmissão indireto. Fonte: NBR 8802 (1994).

O mesmo procedimento mostrado acima é recomendado 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.

A BS 1881: Part 203 (1986) indica que a velocidade obtida pelo modo de transmissão indireta é cerca de 5 a 20% menor do que a velocidade obtida pelo modo de transmissão direto.

Jones (1962) explica que a discrepância entre as velocidades direta e indireta é devido à dispersão das ondas.

Quixian e Bunguey (1996) comparam velocidades pelos modos de transmissão direta e indireta e relatam que a velocidade direta é, normalmente maior que a velocidade indireta.

Yaman *et al* (2001) comparam velocidades de propagação de ondas ultra-sônicas em lajes, utilizando os modos de transmissão direto e indireto. Os autores constataram que as velocidades obtidas pelos modos de transmissão direto e indireto são estatisticamente similares, desde que as lajes apresentem propriedades uniformes, incluindo umidade ao longo da superfície e da espessura. Para garantir umidade constante, no estudo realizado pelos autores, as peças foram curadas até a data dos ensaios (28 dias) seguindo procedimento recomendado pelo MDTO (*Michigan Department of Transportation* – especificação de *decks* de pontes).

Yaman *et al* (2001) também fazem recomendações sobre os procedimentos descritos nas Figuras 2.4 e 2.5, para a obtenção de velocidade de propagação de onda ultra-sônica pelo modo de transmissão indireto, quanto ao número de leituras e distância entre os transdutores. Para obter uma variabilidade menor do que 2% é recomendável que se realize ao menos 4 leituras. A primeira leitura deve ter os transdutores afastados entre si na distância equivalente a pelo menos duas vezes o comprimento de onda “ λ ” e as leituras sucessivas devem ter a distância aumentada em uma vez o comprimento de onda “ λ ”. Distâncias menores podem levar a uma variabilidade fora do aceitável.

Ensaio realizados por Câmara (2006) mostram velocidades obtidas pelo modo de transmissão indireto menores em relação às velocidades obtidas pelo modo direto, em estudo realizado em laboratório para concretos com resistência característica de 20, 25 e 30 MPa. A mesma tendência foi observada por Hadlich *et al* (2006), quando comparando velocidades direta e indireta.

A comparação feita por Komlos *et al* (1996) entre sete normas: British Standard, ASTM, DIN/ISSO 8047 e 1048, GOST, STN e MI, e a RILEM revelou que a maior parte destas normas foi escrita há mais de dez anos, o que indica a falta de progresso nos ensaios ultra-sônicos executados em concreto. A RILEM NDT1 (1972) e a norma BS 1881: Part 203 (1986) mostraram-se

bastante semelhantes, embora a BS 1881 contenha mais detalhes, expressões, tabelas e explicações detalhadas. A Tabela 2.3 apresenta uma lista de normas vigentes para a determinação da velocidade de propagação de ultra-sônica através do concreto.

Tabela 2.3 – Normas para determinação da velocidade de onda ultra-sônica no concreto.
Fonte: Komlos et al (1996).

País	Designação	Ano
Alemanha	ISO/DIS 8047	1983
Bélgica	NBN 15-229	1976
Brasil	NBR 8802	1994
Bulgária	BDS 15013-80	1980
Dinamarca	DS 423,33	1984
Escandinávia	NT BUILD 213	1984
Reino Unido	BS 1881: Part 203	1986
Espanha	UNE 83-308-86	1986
Estados Unidos	ASTM C 597	1983
Hungria	MI 07-3318	1994
México	NOM-C-275-1986	1986
Polónia	PN-B-06261	1974
República Tcheca	STN 73 1371	1981
RILEM	NDT 1	1972
Romênia	C-26-72	1972
Rússia	GOST 17624	1987
Suécia	SS 137240	1983
Venezuela	CONVENIN 1691-80	1980

Por simplificação, neste trabalho, quando for mencionado velocidade entenda-se velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto obtida pelo método direto e quando for mencionado velocidade indireta entenda-se velocidade obtida através do modo de transmissão indireto.

2.4 Fatores Intervenientes

Um grande número de fatores influencia os resultados do ensaio de ultra-som. Naik, Malhotra e Popovics (2004) dividem estes fatores em duas categorias:

- a) Fatores resultantes diretamente das propriedades do concreto:

- Tipo, composição geológica, tamanho e granulometria do agregado graúdo;
- Tipo de cimento;
- Uso de aditivos;
- Relação água/cimento;
- Grau de compactação;
- Condições de cura e idade do concreto;
- Condições de umidade do concreto;
- Temperatura do concreto;
- Nível de tensão a que o material está submetido.

b) Fatores que afetam somente as medições de velocidade, não interferindo nas propriedades do concreto:

- Perfeito contato entre os transdutores e o concreto;
- Comprimento de onda;
- Tamanho e forma das amostras;
- Presença de armaduras;
- Presença de não homogeneidades, fissuras e ninhos de concretagem.

Estes fatores intervenientes serão discutidos na seqüência deste capítulo.

2.4.1 Tipo, Composição Geológica, Tamanho e Granulometria do Agregado Graúdo

Segundo Naik, Malhotra e Popovics (2004), diversos pesquisadores concluíram que a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas varia com as características do agregado graúdo.

Tendo em vista que o agregado graúdo ocupa grande parte do volume de uma peça de concreto e que diferentes agregados graúdos apresentam diferentes velocidades de propagação de onda em uma faixa muito ampla de 2500 a 6000 m/s. Segundo Chung e Law (1983), é esperado que agregados graúdos mais densos produzam concretos com velocidades maiores. Na Tabela 2.4 encontram-se valores de velocidades para diferentes tipos de rochas normalmente utilizadas como agregados.

Tabela 2.4 – Intervalos de velocidade de ondas ultra-sônicas para alguns tipos de rocha. Fonte: Chung e Law (1983).

Tipo de rocha	Velocidade (m/s)
Basalto	5270 - 6020
Dolomita	4370 - 6090
Granito	4000 - 5790
Calcário	3910 - 5780
Arenito	2550 - 4230
Quartzito	5570 - 5720

Nos estudos realizados por Kaplan (1959) *apud* Hamassaki (1986), Facaoaru (1961) *apud* Hamassaki (1986), Sturup, Vecchio e Catarin (1984) Nogueira e Willian (2001) e Evangelista (2002) utilizando diversos tipos de agregados graúdos, compara-se velocidade de propagação de onda ultra-sônica com resistência à compressão.

Kaplan (1959) *apud* Hamassaki (1986) pesquisou vários tipos de agregados para um mesmo traço de concreto, visando avaliar sua influência na relação velocidade *versus* resistência. A conclusão obtida foi a de que concretos com semelhantes resistências à compressão podem ter diferentes

velocidades, em função dos tipos de agregados utilizados. Na Figura 2.6 estão representados graficamente os resultados.

Facaoaru (1961) *apud* Hamassaki (1986) apresentou estudo com resultados semelhantes, quanto à influência do tipo de agregado graúdo utilizado, em um concreto com as seguintes características: relação água/cimento de 0,5, dimensão máxima característica do agregado de 15 mm e consumo de cimento da ordem de 300 kg/m³ de concreto. Uma representação gráfica dos resultados está na Figura 2.7.

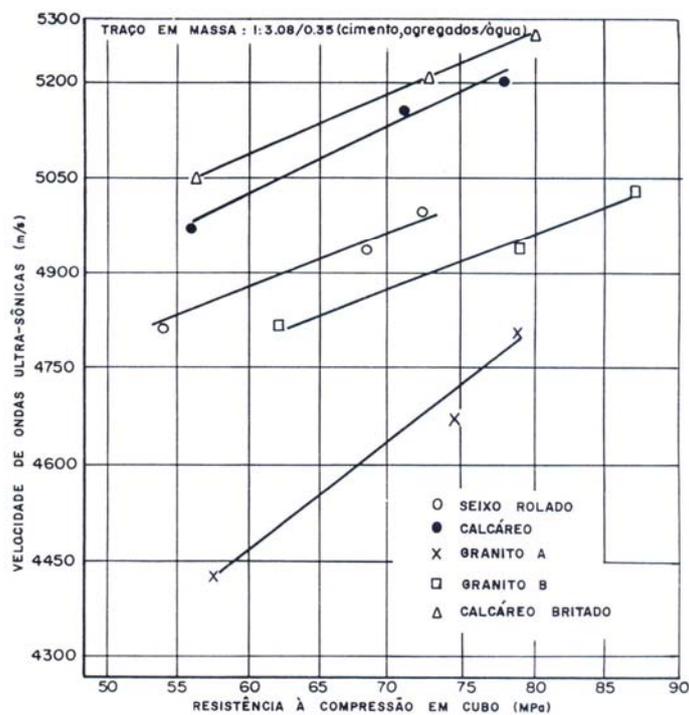


Figura 2.6 – Correlação entre o ultra-som e a resistência à compressão, em concretos com diferentes tipos de agregados graúdos.
Fonte: Kaplan (1959) *apud* Hamassaki (1986).

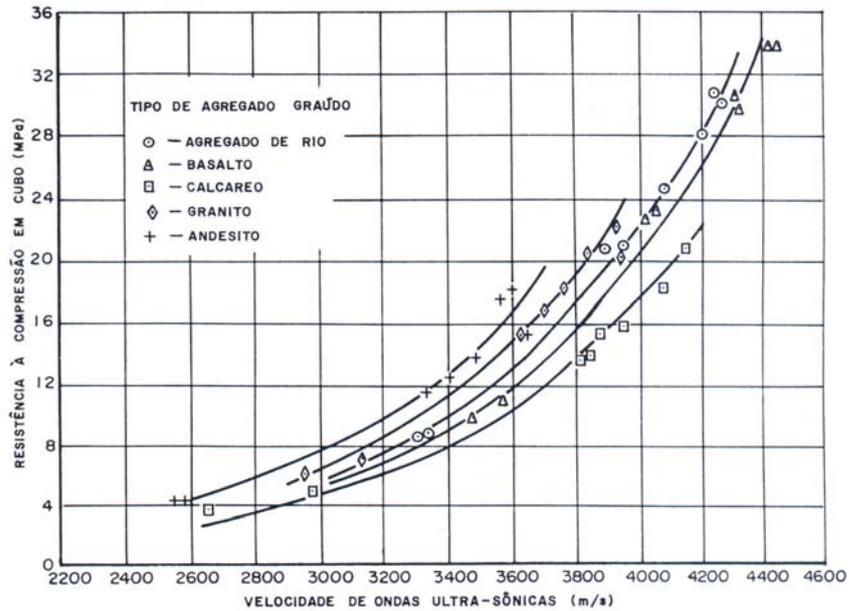


Figura 2.7 – Correlação entre a resistência à compressão e o ultra-som, em concretos com diferentes tipos de agregados graúdos. Fonte: Facaoaru (1961) *apud* Hamassaki (1986).

Os agregados graúdos em geral têm módulo de elasticidade e velocidade de propagação de onda ultra-sônica maiores do que a argamassa, que por sua vez são maiores do que o módulo e a velocidade na pasta de cimento (STURRUP, VECCHIO e CATARIN, 1984). Estas diferenças ficam evidentes na Figura 2.8.

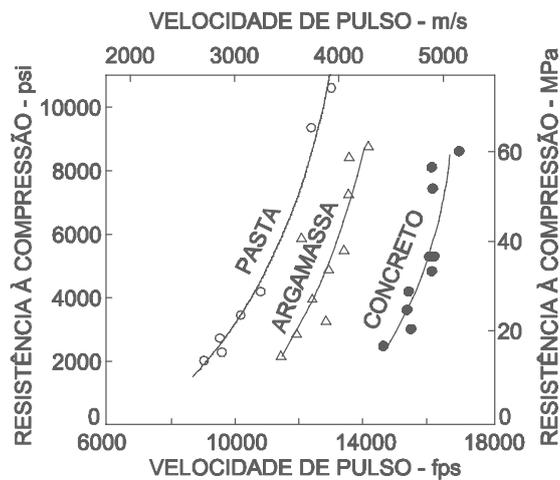


Figura 2.8 – Efeito do proporcionamento da mistura na correlação entre velocidade de pulso e a resistência à compressão. Fonte: Sturrup, Vecchio e Catarin (1984).

Sturup, Vecchio e Catarin (1984) também verificaram a influência da dimensão máxima do agregado com 20 e 40 mm. Os concretos confeccionados com agregados de maior dimensão máxima resultaram em maiores velocidades, conforme a Figura 2.9.

Apesar de não haver uma correlação direta entre a velocidade e a resistência à compressão, fica claro que concretos com agregados graúdos maiores e/ou em maior proporção possuem valores maiores de velocidade.

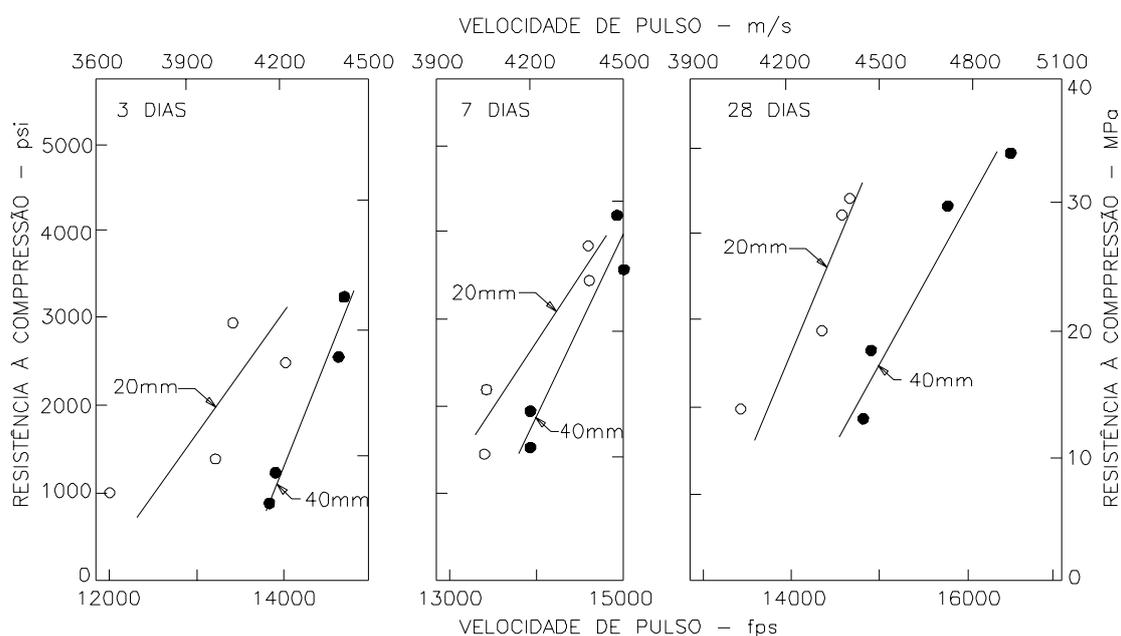


Figura 2.9 – Efeito do tamanho máximo do agregado na correlação entre as velocidades de pulso e a resistência. Fonte: Sturup, Vecchio e Catarin (1984).

No programa experimental desenvolvido por Nogueira e Willian (2001), foi variado o diâmetro máximo do agregado graúdo: entre 12,5, 9,5 e 4,75 mm. A maior velocidade de propagação de onda ultra-sônica ocorreu no concreto com agregado graúdo de maior diâmetro.

Evangelista (2002) estudou um grande número de composições de concretos e no que se refere à velocidade *versus* dimensão máxima do agregado graúdo concluiu que a velocidade foi maior nos concretos com agregado graúdo de maior diâmetro.

As maiores velocidades para concretos com agregados graúdos maiores e/ou em maior proporção provavelmente se deve ao fato de que o agregado graúdo maior tem superfície específica menor e portanto produz menos pasta de cimento do que o agregado graúdo menor. Havendo menos pasta de cimento, há menos poros, o que justifica velocidades maiores.

2.4.2 Tipo de Cimento

Jones (1962) relata que o tipo de cimento não tem um efeito significativo na velocidade de propagação de onda ultra-sônica. A taxa de hidratação do cimento, entretanto, é diferente para diferentes tipos de cimento e vai influenciar a velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Se o grau de hidratação aumenta, o módulo de elasticidade aumenta e, por conseqüência, a velocidade também aumentará.

A Figura 2.10 ilustra o estudo desenvolvido por Sturup, Vecchio e Catarin (1984). Como a curva representa o aumento da idade do concreto da esquerda para a direita, percebe-se nas idades iniciais, notáveis mudanças no comportamento dos concretos moldados com o uso de diferentes tipos de cimento. Em idades mais avançadas, já não existe uma tendência marcante nesse sentido.

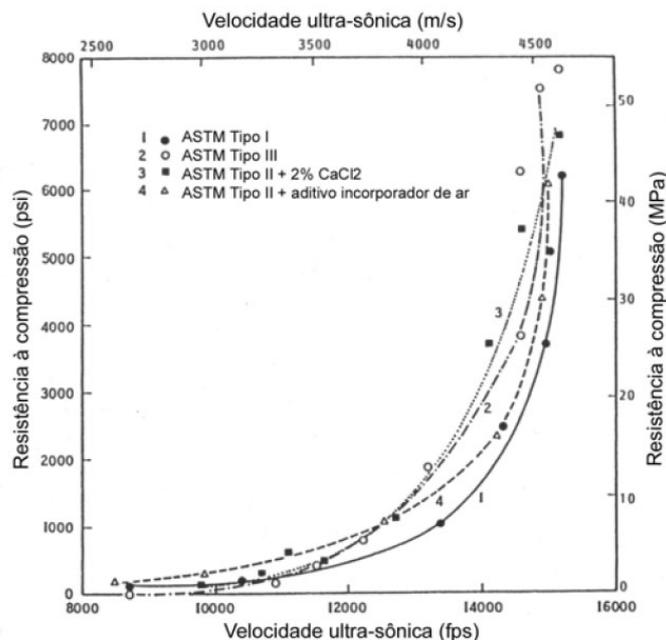


Figura 2.10 – Efeito do tipo de cimento e aditivo na correlação entre a velocidade ultra-sônica e a resistência à compressão. Fonte: Sturruv, Vecchio e Catarin (1984).

Elvery e Ibrahim (1976) *apud* Hamassaki (1986), após pesquisa efetuada com cimentos dos tipos Portland comum, alta resistência inicial e aluminoso, em idades de 10 a 48 horas, verificaram que o concreto obtido com cimento aluminoso apresentou, para um mesmo nível de resistência, resultados de velocidade de 150 a 200 m/s menores que os concretos moldados com uso de cimento ARI e Portland comum.

O cimento aluminoso produz concretos de estrutura interna mais densa, o que explica a maior resistência para a mesma velocidade comparando com os outros cimentos.

Entre os dois últimos concretos, a diferença dos resultados de velocidade se mostrou acentuada somente nas primeiras horas de ensaio. A Figura 2.11 ilustra estas diferenças.

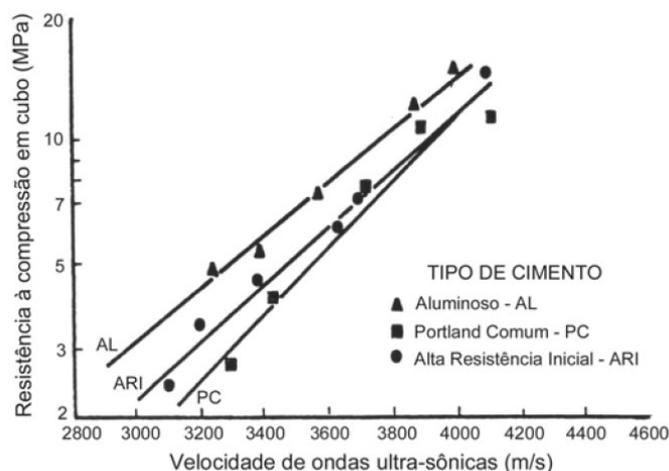


Figura 2.11 – Correlação entre a resistência à compressão em cubo (escala logarítmica) e a velocidade ultra-sônica. Fonte: Elvery e Ibrahim (1976) *apud* Hamassaki (1986)

Facaoaru (1961) *apud* Hamassaki (1986), concluiu, após estudo efetuado em concretos com consumo de cimento de 300 kg/m^3 e relação água/cimento de 0,45, que dos cinco tipos de cimento ensaiados, o cimento de alta resistência inicial (ARI), apresentou resultados da ordem de 200 m/s maiores que os resultados obtidos com os demais tipos de cimento. Esse comportamento provavelmente deve-se ao rápido desenvolvimento das reações de hidratação e densificação da estrutura interna dos concretos moldados com o uso do cimento ARI. A Figura 2.12 ilustra os resultados.

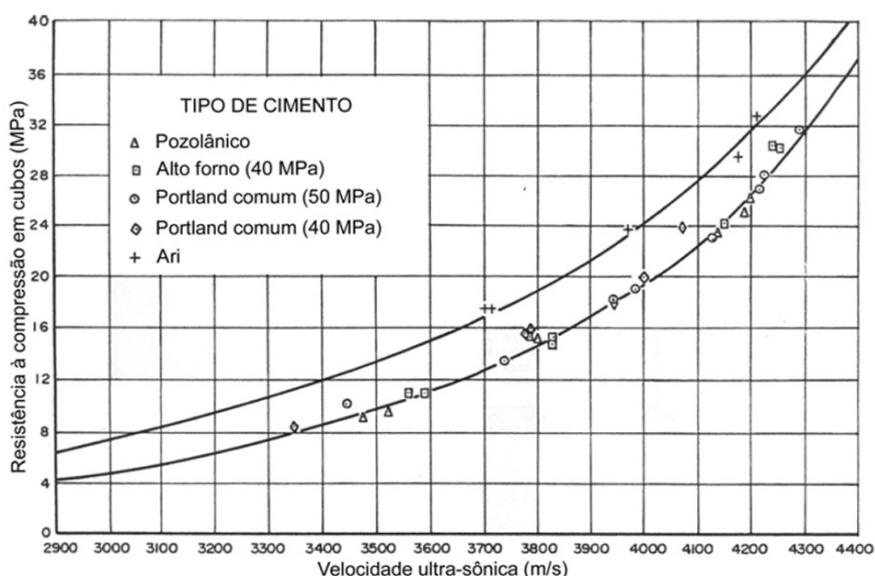


Figura 2.12 – Correlação entre a resistência à compressão e a velocidade ultra-sônica. Fonte Facaoaru (1961) *apud* Hamassaki (1986).

Evangelista (2002) quando comparou o cimento CPIII e CPV-ARI encontrou valores de velocidade de propagação de onda ultra-sônica da ordem de 5% maiores para o CPV-ARI.

2.4.3 Aditivos

A utilização de aditivos em concreto pode alterar propriedades como resistência, durabilidade, módulo de elasticidade, porosidade, densidade, velocidade de propagação de onda ultra-sônica entre outras.

Naik, Malhotra e Popovics (2004) afirmam que aditivos influenciam a velocidade aproximadamente da mesma maneira que influenciam a taxa de hidratação do cimento.

Existe uma infinidade de aditivos para concreto para diferentes fins. Um exemplo da influência do uso de aditivos na velocidade é o estudo realizado por Almeida (1993), sobre o emprego de ensaios não-destrutivos na avaliação qualitativa de concretos de alto desempenho, que comparou velocidades em concretos com dez diferentes composições.

O traço dos dez concretos preparados foi diferente, em cinco destes traços foi utilizado um aditivo químico na proporção de 15 kg/m³ de concreto. O aditivo químico utilizado foi um redutor de água do tipo superplastificante, com massa específica de 1,20, comercializado na forma líquida, de base química naftaleno sulfonato.

Na Figura 2.13, onde as composições com aditivo são identificadas pelas linhas tracejadas, pode-se observar que os valores de velocidade são nitidamente superiores para as composições que utilizaram o aditivo.

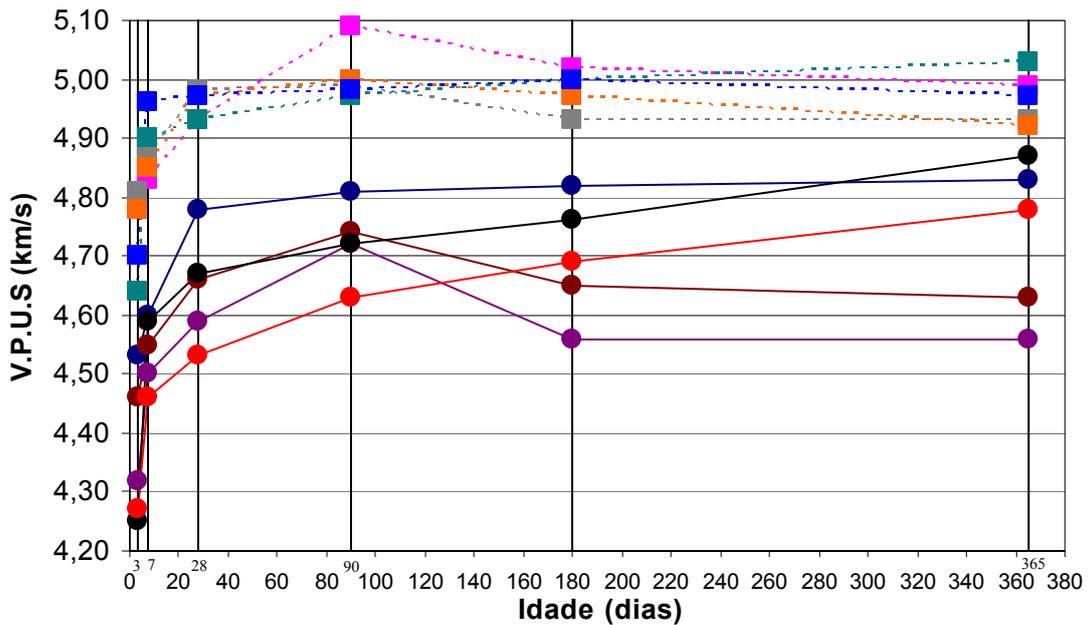


Figura 2.13 – Variação da velocidade com o tempo. Fonte: Almeida (1993).

A explicação para as velocidades maiores para os concretos com aditivo superplastificante está na redução de água proporcionada pelo aditivo. Concretos com menor relação água/cimento têm menor quantidade de vazios e poros mais finos, resultando em maior velocidade, como será apresentado a seguir.

2.4.4 Relação Água/cimento

Kaplan (1959) *apud* Naik, Malhotra e Popovics (2004) estudou os efeitos da relação água/cimento na velocidade de propagação de onda ultra-sônica. O autor comprovou que um aumento na relação água/cimento corresponde a uma diminuição na velocidade. Apesar de uma relação água/cimento maior conduzir a uma diminuição da densidade, a velocidade é menor, pois o efeito da relação água/cimento maior diminui o módulo de elasticidade em maior proporção, conforme a Equação 2.1.

A influência da variação da relação água/cimento, para uma mesma relação agregado/cimento, nos resultados de ultra-som e resistência, foi

estudada por Facaoaru (1961) *apud* Hamassaki (1986), para um concreto com consumo de cimento da ordem de 300 kg/m^3 de concreto, com variações da relação água/cimento, em massa, de 0,36 a 0,70. O autor fez o estudo no intuito de verificar a influência da variação da relação água/cimento na correlação de velocidade com resistência à compressão, concluindo que não houve influência, pois, para uma determinada variação da relação água/cimento, as correspondentes variações de ultra-som e resistência à compressão foram proporcionais entre si. Entretanto como é possível visualizar na Figura 2.14, os pontos correspondentes às menores relações água/cimento (0,36 e 0,40) marcam os maiores valores de velocidade.

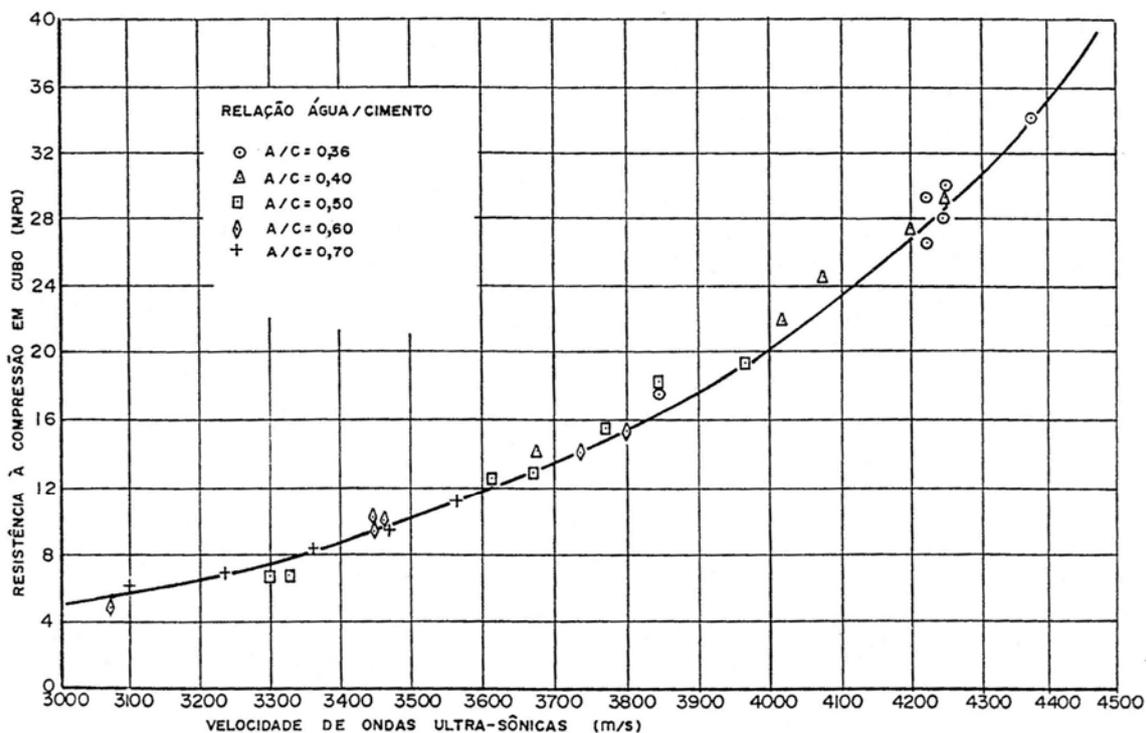


Figura 2.14 – Correlação entre a resistência à compressão e o ultra-som, em concretos com diferentes relações água/cimento. Fonte Facaoaru (1961) *apud* Hamassaki (1986).

2.4.5 Grau de Compactação

O concreto adensado manualmente ou vibrado de forma inadequada é menos denso do que um concreto bem vibrado. O concreto mal vibrado tem

menor velocidade, pois tem uma redução no módulo de elasticidade mais significativa do que a redução da densidade, conforme a Equação 2.1.

Davis (1977) *apud* Hamassaki (1986) observou variações dos resultados de ultra-som ao longo de colunas de concreto, citando três motivos para menores velocidades nas regiões superiores: o movimento da água através do concreto, durante o adensamento, em direção à superfície, causando aumento da relação água/cimento nessa região. As regiões inferiores têm resistência, e conseqüentemente, densidade aumentada pelos efeitos de pressão das camadas superiores de concreto e finalmente, também o movimento de ar, durante o adensamento, torna o concreto menos denso, nas regiões superiores.

Existem variações nas leituras de velocidade ultra-sônica conforme a direção de propagação da onda em relação à direção em que a peça foi concretada. Quando a peça é ensaiada transversalmente à direção em que foi concretada, a velocidade é, em média, um pouco superior àquela obtida quando o ensaio é feito paralelo às camadas de concretagem. Essa diferença é atribuída ao fato de que as camadas superficiais do concreto geralmente possuem qualidade inferior (devido a fenômenos de segregação, exsudação e ao efeito parede) (BAUER, 1987).

Câmara (2006) e Hadlich *et al* (2006) verificaram em prismas moldados em laboratório que a velocidade medida próximo à superfície de concretagem foi de 2 a 5 % menor do que a velocidade medida próxima à base dos prismas, concluindo que, em um nível inferior, o grau de adensamento tende a ser maior e, conseqüentemente, a velocidade também é maior.

2.4.6 Condições de Cura

Kaplan (1959) *apud* Naik, Malhotra e Popovics (2004), afirma que a velocidade em concretos curados em laboratório é maior do que a velocidade em concretos curados em campo. Estas diferenças se dão principalmente pelo

controle de temperatura e umidade no laboratório. Estes fatores serão abordados na seqüência deste capítulo.

2.4.7 Idade do Concreto

Jones (1962) afirma que o efeito da idade na velocidade no concreto é similar ao efeito da evolução da resistência. A velocidade aumenta muito rápido nas primeiras idades e se estabiliza em poucos dias, semelhante à evolução de resistência de um concreto feito com cimentos de alta resistência inicial. Esta evolução da velocidade geralmente atinge valores limites antes da resistência.

De acordo com Orchard (1978) nas primeiras idades há um rápido aumento da velocidade, enquanto que, nas idades mais avançadas este aumento é mais suave. A Figura 2.15 ilustra esta situação.

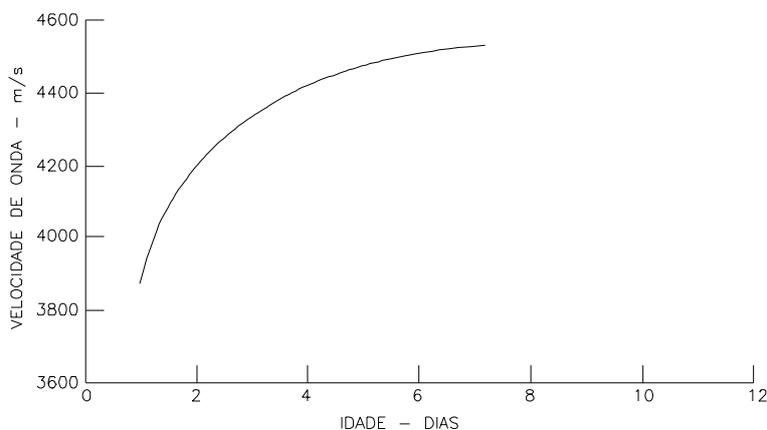


Figura 2.15 –Relação entre velocidade de onda e idade. Fonte: Orchard (1978).

Sturup, Vecchio e Catarin (1984) realizaram uma série de ensaios de ultra-som para correlacionar com resistência à compressão. Em um destes estudos fica claro que a velocidade pouco varia a partir dos 7 dias, conforme a Figura 2.16.

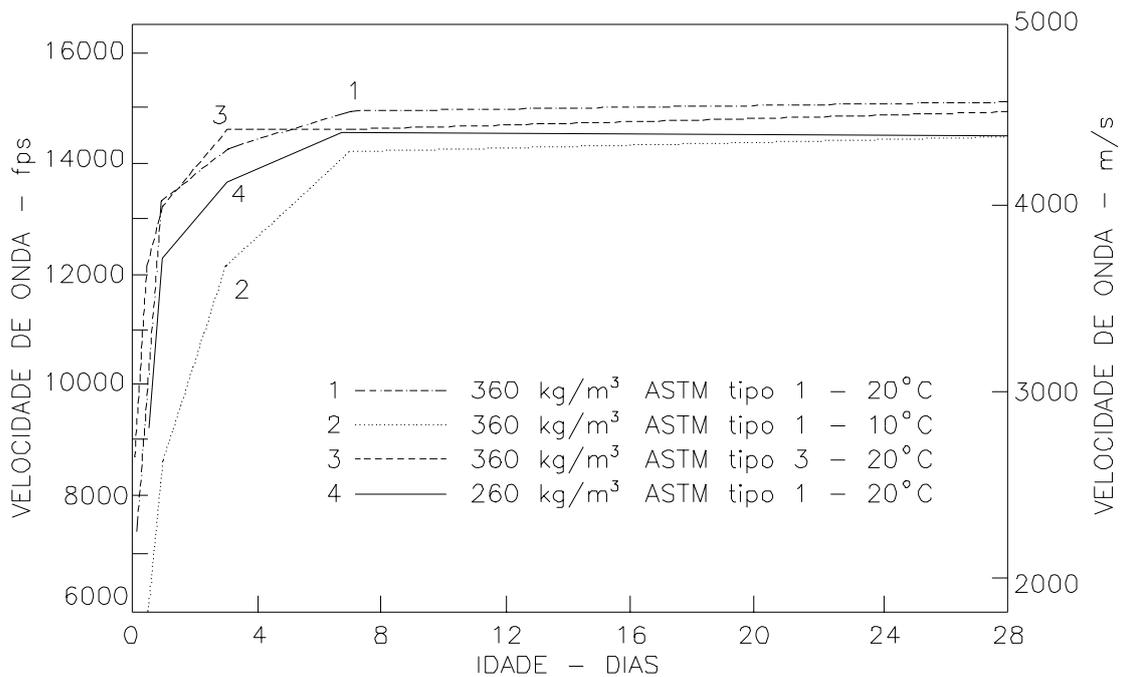


Figura 2.16 – Influência da idade na evolução da velocidade de propagação para concretos com diferentes tipos e teores de cimento submetidos a diferentes temperaturas de cura. Fonte: Sturup, Vecchio e Catarin (1984).

A Figura 2.13 mostrou a rápida evolução da velocidade nos primeiros dias e a evolução mais lenta e variada em idades mais avançadas. Na Figura 2.13 pode-se ver um decréscimo da velocidade para algumas composições de concreto a partir dos 90 dias. Almeida (1993), depois de ampla pesquisa bibliográfica para encontrar uma explicação para este fenômeno inesperado, conseguiu justificar o fenômeno devido à auto-dessecação do concreto.

Segundo Neville e Brook (1987) *apud* Almeida (1993), o fenômeno da auto-dessecação ocorre em corpos-de-prova de concreto com baixas relações água/cimento, isolados do meio ambiente, quando a água que normalmente preenche os poros capilares é consumida pela própria hidratação do cimento. Em um corpo-de-prova não selado, contudo, se a cura (hidratação) se processar até que os poros capilares tornem-se segmentados, o concreto se tornará impermeável, funcionando então, a partir daí, como se estivesse selado.

De acordo com Almeida (1993), mesmo quando submetidos à cura por imersão em água, os corpos-de-prova de concretos de alto desempenho, por conta das baixas relações água/cimento (obtidos a partir de dosagens

relativamente elevadas de aditivos químicos com alto poder de redução de água), sofrem hidratação mais rápida e completa na superfície que no interior, o que segmenta os poros capilares e os impermeabiliza, passando então a funcionar como um sistema selado, sem troca de umidade com o exterior.

Como a oferta de água interna ao corpo-de-prova é limitada para uma completa hidratação das partículas do(s) aglomerante(s), a partir de certa idade os concretos de alto desempenho podem sofrer os efeitos da auto-dessecação. Surgem então microfissuras e aumenta o volume de poros capilares vazios. Os poros e fissuras, à medida que vão sendo paulatinamente dessecados pelo próprio processo de hidratação dos aglomerantes, passam a ser responsáveis por alterações significativas da velocidade dos concretos, já que as ondas sonoras propagam-se muito mais rápido na água que no ar (ALMEIDA, 1993).

2.4.8 Condições de Superfície

De acordo com a NM 58 (1996), as superfícies do concreto devem ser lisas, evitando-se realizar medições onde existam rugosidades, caso contrário sugere-se a realização de um polimento. Pode-se aplicar uma fina camada de resina tipo epóxi ou de uma argamassa de pega rápida (GRULLÓN *et al* 2004). Caso não seja possível evitar superfícies rugosas, a RILEM NDT 1 (1972) recomenda que se aumente a distância entre os transdutores para uma distância mínima de 150 mm (modo de transmissão direto) e 400 mm (modo de transmissão indireto).

Devem ser evitadas superfícies que receberam acabamento, pois as propriedades do concreto e da camada superficial não são necessariamente as mesmas do concreto no interior da peça (MACHADO, 2005).

2.4.9 Temperatura

De acordo com a RILEM NDT 1 (1972) a velocidade é influenciada pela temperatura, caso esta se apresente superior a 30° C ou inferior a 5° C. Para temperaturas de 40° C a 60° C, há redução da velocidade causada por microfissuração interna do concreto. Na situação de congelamento do concreto, a velocidade é maior devido à água que congelou no interior do concreto. Segundo a RILEM, em temperaturas superiores a 30° C e inferiores a 5° C ocorrem alterações na velocidade que devem ser consideradas e corrigidas de acordo com a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Correções para velocidade de propagação de onda ultra-sônica devido a variações de temperatura. Fonte: RILEM NDT 1 (1972).

Temperatura (°C)	Correção (%)	
	Concreto seco	Concreto saturado
+ 60	+ 5	+ 4
+ 40	+ 2	+ 1,7
+ 20	0	0
0	- 0,5	- 1
Abaixo de - 4	- 1,5	- 7,5

A influência da temperatura na ocasião da preparação do concreto foi investigada por Abassi e Al-Tayyib (1996). Para ensaios onde a temperatura variou de 32° C a 50° C verificou-se que a velocidade diminuiu com o aumento da temperatura de cura do concreto.

Em estudo efetuado por Meneghetti (1999) em concretos referência e concretos obtidos com uso de aditivos superplastificante e plastificante com várias relações água/cimento e concreto com uso de 8% de sílica ativa com relação água/cimento igual a 0,30, procedeu-se ensaios nas idades de 12, 16, 24 e 72 horas, a temperaturas de 25° C, 35° C e 45° C. Os resultados mostram que os concretos mantidos a temperatura de 45° C apresentaram velocidades menores que os mesmos concretos conservados nas temperaturas de 25° C e 35° C.

2.4.10 Umidade

De acordo com Chung e Law (1983), o teor de umidade tem uma pequena influência na velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Ensaios realizados em laboratório pelos autores em um concreto com condição saturada resultaram em uma velocidade cerca de 2% maior do que na condição seca.

Visto que a velocidade do som nos líquidos é maior do que nos gases, quando os poros do concreto encontram-se preenchidos com água, verificam-se aumentos de até 5% nos valores de velocidade ultra-sônica (BUNGEY, 1989).

A Figura 2.17 ilustra os resultados obtidos por Sturup, Vecchio e Catarin (1984), em pastas, argamassas e concreto, que comprovam o efeito da umidade na velocidade.

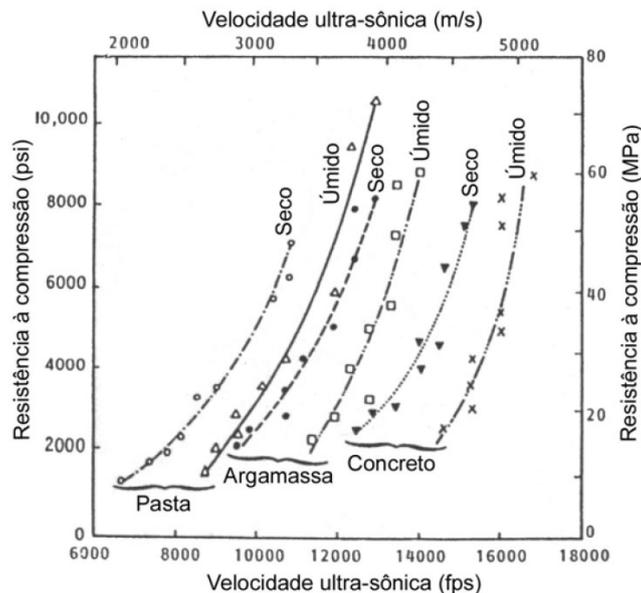


Figura 2.17 – Efeito da umidade na velocidade de propagação de onda ultra-sônica.
Fonte: Sturup, Vecchio e Catarin (1984).

Ohdaira e Masuzawa (2000) e Popovics (2000) descrevem que a velocidade é maior em condições úmidas do que secas.

No programa experimental realizado por Dornelles *et al* (2004) observou-se que a velocidade no concreto saturado foi cerca de 7% superior a do concreto seco.

Coutinho (1973) *apud* Almeida (1993) apresenta os seguintes valores para propagação de ondas sonoras:

- No ar: 330 m/s;
- Na água: 1450 m/s;
- Na pasta de cimento: de 3500 m/s a 4000 m/s;
- Nos agregados: de 4200 m/s a 5000 m/s.

O autor supracitado considera que a velocidade de propagação de onda ultra-sônica no sólido composto por esses elementos é uma consequência da percentagem de cada um dos elementos no volume total do sólido. Em um concreto convencional, o autor estima que os vazios ocupem 2%, a pasta de cimento 20%, a água livre 10% e os agregados 68%.

2.4.11 Distância Percorrida pela Onda Ultra-sônica, Tamanho e Forma da Peça e Comprimento de Onda

Naik, Malhotra e Popovics (2004) afirmam que a distância percorrida pela onda ultra-sônica, bem como sua frequência, não devem afetar o tempo de propagação ou, conseqüentemente, o valor da velocidade.

Sturupp, Vecchio e Catarin (1984) observaram que, para pequenas distâncias (menor que 50 mm), há discrepância no valor da velocidade. Por isto, a norma EN-ISO 8047 (1994) recomenda distâncias mínimas entre os transdutores, a fim de evitar erros nas leituras: de 100 mm para concretos com agregados de dimensão máxima igual ou inferior a 20 mm; de 150 mm para concretos com agregados de dimensão máxima entre 20 e 40 mm.

De acordo com Naik, Malhotra e Popovics (2004), geralmente a velocidade não depende nem do tamanho nem da forma do elemento a ser ensaiado. Entretanto, a Equação 2.1 só é válida para um meio de extensão infinita. Para que este requisito seja atendido em um elemento de dimensões finitas, basta que sua menor dimensão seja superior ao comprimento de onda.

O comprimento de onda “ λ ” é calculado pela Equação 2.4.

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2.4)$$

Onde:

f = frequência de vibração;

V = velocidade de propagação de onda ultra-sônica.

A dimensão máxima dos agregados graúdos também deve ser inferior ao comprimento de onda. Caso contrário, a energia da onda será atenuada de tal forma que poderá ocasionar uma perda de sinal no receptor (BUNGEY, 1989).

Para transdutores comercialmente disponíveis, sendo mais utilizado o transdutor de frequência natural de 54 kHz, adotando uma velocidade de 4000 m/s o comprimento de onda “ λ ” será de 74 mm. Transdutores de frequências naturais menores (20 kHz) fornecem comprimentos de onda maiores ($\lambda = 200$ mm), possuem maior energia e são utilizados para medidas em peças de grande dimensão, até 30 m. Já os transdutores de frequência natural maiores (200 a 1000 kHz) fornecem comprimentos de onda menores ($\lambda \leq 20$ mm) e podem ser utilizados para medidas em peças de pequenas dimensões (dimensões laterais de 50 mm ou menos). Para velocidades maiores o comprimento de onda “ λ ” será proporcionalmente maior (BUNGEY, 1989).

2.4.12 Estado de Tensões

Bungey (1989) afirma que tensões abaixo de 50% da tensão de ruptura não causam diferenças nos valores de velocidade de propagação de onda ultra-sônica.

De acordo com Naik, Malhotra e Popovics (2004) a redução na velocidade ocorre quando a tensão alcança 65% da tensão de ruptura. Nogueira e Willian (2001) constataram uma redução significativa no valor de velocidade quando a tensão alcançou 70% da tensão de ruptura, possivelmente devido à microfissuração.

2.4.13 Presença de Armaduras

A presença de armadura é um dos principais fatores que podem influenciar a velocidade de propagação da onda ultra-sônica no concreto. No caso do concreto armado, a velocidade obtida próximo das armaduras é superior à que é obtida em um concreto simples de igual composição, pois a onda pode percorrer uma parte do percurso através do concreto e outra parte através do aço (BUNGEY, 1984).

É consenso que o valor de velocidade de propagação de onda ultra-sônica é maior no aço do que no concreto. Naik, Malhotra e Popovics (2004) indicam que a velocidade no aço seja cerca de 40% a 70% maior que a velocidade no concreto, sendo que a velocidade no aço, para um meio sólido e infinito é da ordem de 5900 m/s. Entretanto a velocidade em uma barra de aço cilíndrica, de pequena seção transversal, como por exemplo as disponíveis no mercado para concreto armado, podem ter o valor de 5200 m/s.

Bungey (1984) faz a mesma constatação quanto à velocidade no aço no valor de aproximadamente 5900 m/s, e indica que para uma barra de aço com diâmetro de 10 mm a velocidade seria de 5100 m/s.

Visto que a proximidade de barras de aço das leituras de ultra-som eleva a velocidade, torna-se necessário conhecer as variáveis envolvidas neste aumento para corrigir estes valores. De acordo com a RILEM NDT 1 (1972) e a NM 58 (1996), o aumento no valor de velocidade depende da proximidade entre as barras de aço e a trajetória da onda, do diâmetro, do número e da direção das barras com relação à trajetória das ondas.

É recomendável que os ensaios de ultra-som sejam realizados afastados das regiões onde existem armaduras. Quando isto não for possível, fatores de correção devem ser aplicados aos valores obtidos nos ensaios para que se possa estimar o valor de velocidade de propagação de onda no concreto (BUNGEY, 1984).

A RILEM NDT 1 (1972) recomenda fatores de correção do valor de velocidade levando em conta dois parâmetros básicos: a velocidade ao redor da armadura e o percurso percorrido pelo pulso através do aço e do concreto. Estes fatores de correção são mostrados a seguir.

2.4.13.1. Barras Perpendiculares à Direção de Propagação

A influência da presença de armaduras perpendiculares à direção de propagação pode ser calculada assumindo-se que o pulso atravessa todo o diâmetro de cada barra durante o percurso. Se houver “ n ” diferentes barras de diâmetros Q_i ($i = 1$ a n) diretamente no percurso do pulso, com seus eixos perpendiculares ao percurso de propagação conforme a Figura 2.18, então uma relação entre a velocidade obtida no concreto com barras de aço e em um concreto de mesma constituição sem barras de aço é apresentada na Equação 2.5.

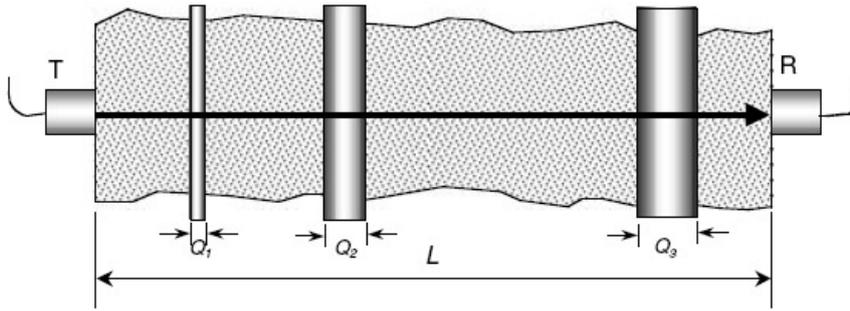


Figura 2.18 – Leitura de ultra-som em concreto armado – barras perpendiculares à direção de propagação. Fonte RILEM NDT 1 (1972).

$$\frac{V_c}{V_e} = 1 - \frac{L_s}{L} \left(1 - \frac{V_c}{V_s} \right) \quad (2.5)$$

Onde:

V_e = velocidade no concreto armado, valor medido no ensaio;

V_c = velocidade no concreto simples;

V_s = velocidade no aço;

L = percurso total;

L_s = percurso através do aço.

$$L_s = \sum_i^n Q_i \quad (2.6)$$

Os valores de V_c / V_e são mostrados na Tabela 2.6 para diferentes quantidades de aço em três tipos de concreto, classificados como de qualidade baixa, razoável ou muito boa.

Tabela 2.6 – Fatores de correção dos valores de V_e – Eixo da Barra Perpendicular ao percurso da onda ultra-sônica. Fonte RILEM NDT 1 (1972).

L_s/L	Vel. No concreto simples (V_c) - Vel. medida no concreto armado (V_e)		
	$V_c = 3000$ m/s (qualidade muito baixa)	$V_c = 4000$ m/s (qualidade razoável)	$V_c = 5000$ m/s (qualidade muito boa)
1 / 12	0,96	0,97	0,99
1 / 8	0,94	0,96	0,98
1 / 6	0,92	0,94	0,97
1 / 4	0,88	0,92	0,96
1 / 3	0,83	0,89	0,94
1 / 2	0,75	0,83	0,92

Na prática os valores de V_c / V_e são um pouco maiores do que os mostrados na Tabela 2.6, pelo fato de as barras não estarem perfeitamente alinhadas e porque apenas uma parte do pulso atravessa todo o diâmetro da barra.

2.4.13.2. Barras Paralelas à Direção de Propagação

Se a face de uma barra estiver localizado a uma distância “ a ” da linha que une os pontos mais próximos dos dois transdutores, e o caminho entre os transdutores for “ L ”, então o tempo de propagação “ T ”, obtido em leituras conforme mostrado nas Figuras 2.19 e 2.20, pode ser expresso de acordo com a Equação 2.7.

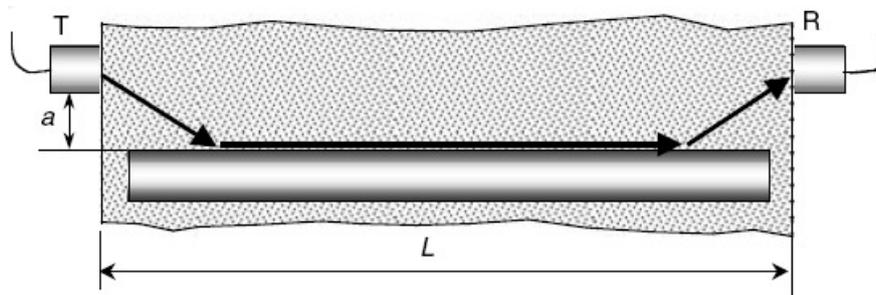


Figura 2.19 – Leitura de ultra-som em concreto armado – barras paralelas à direção de propagação, modo de transmissão direto. Fonte: RILEM NDT 1 (1972).

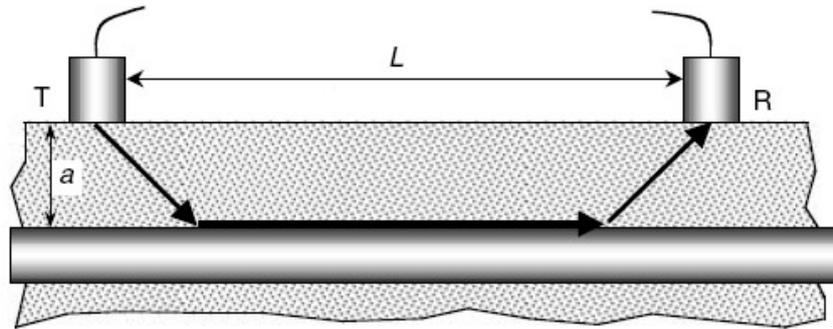


Figura 2.20 – Leitura de ultra-som em concreto armado – barras paralelas à direção de propagação, modo de transmissão indireto. Fonte: RILEM NDT 1 (1972).

$$T = \frac{L}{V_s} + 2a \sqrt{\frac{V_s - V_c}{V_s V_c}} \quad (2.7)$$

A influência das barras de aço é significativa quando for satisfeita a condição da Equação 2.8, caso contrário não há influência das barras de aço.

$$\frac{a}{L} \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_c}{V_s + V_c}} \quad (2.8)$$

Porém, pode ser difícil utilizar as Equações 2.7 e 2.8 devido à incerteza no valor da velocidade no aço “ V_s ”, conforme citado anteriormente. A RILEM NDT 1 (1972), então, fornece fatores de correção na Tabela 2.7, para diferentes relações entre a velocidade no concreto simples e no concreto armado.

Tabela 2.7 – Fatores de correção dos valores de V_e – Eixo da barra paralelo ao percurso da onda ultra-sônica. Fonte: RILEM NDT 1 (1972).

a/L	Vel. No concreto simples (V_c) / Vel. medida no concreto armado (V_e)			
	$V_c / V_s = 0,90$	$V_c / V_s = 0,80$	$V_c / V_s = 0,70$	$V_c / V_s = 0,60$
0	0,90	1,80	0,71	0,60
1 / 20	0,94	0,86	0,78	0,68
1 / 15	0,96	0,88	0,80	0,71
1 / 10	0,99	0,92	0,85	0,76
1 / 7	1,00	0,97	0,91	0,83
1 / 5	1,00	1,00	0,99	0,92
1 / 4	1,00	1,00	1,00	1,00

Com base nos fatores de correção da Tabela 2.7, pode-se concluir que a influência das barras de aço, paralelas à direção de propagação da onda e afastadas mais de 25% da distância entre os transdutores pode ser desprezada.

Outros pesquisadores estudaram a influência das barras e os fatores de correção propostos pelas normas européias. Chung (1978) demonstrou a importância de se levar em conta o diâmetro das barras de aço nos fatores de correção. De acordo com o autor, é significativa a influência de barras de aço com eixo coincidente à direção de propagação da onda de diâmetro superior a 10 mm. Neste caso, ele recomenda a utilização da Equação 2.9, para a utilização de transdutores com frequência natural igual a 50 kHz.

$$V = 5,90 - 10,40(5,90 - V_c) / d \quad (2.9)$$

Onde:

V = velocidade no concreto simples;

V_c = velocidade no concreto com armadura;

d = diâmetro da barra em milímetros.

Bunguey (1984) também propõe ábacos para estes fatores de correção. No caso de barras paralelas ao percurso da onda o ábaco leva em conta o diâmetro das barras de 6 a 50 mm. De acordo com o autor, barras longitudinais

com diâmetros superiores a 6 mm paralelas ao percurso das ondas, a influência é significativa, como mostra a Figura 2.21.

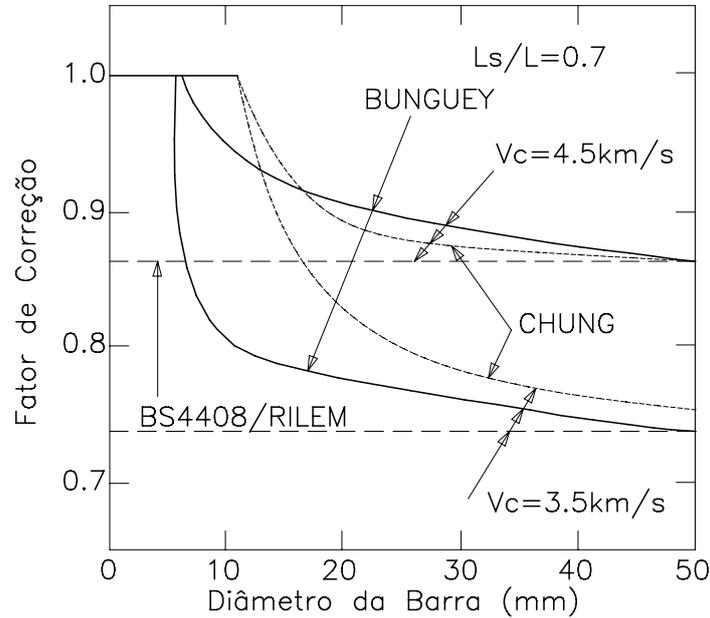


Figura 2.21 - Ábaco: Fator de correção versus Diâmetro da barra - Barras paralelas ao percurso da onda. Fonte: Bunguey (1984).

Bunguey (1984) ainda relata que a zona de influência das barras perpendiculares ao percurso é significativamente menor do que a das barras paralelas. A Figura 2.22 apresenta o ábaco proposto pelo autor que indica que barras perpendiculares de diâmetro inferior a 20 mm praticamente não são detectadas em concreto onde se tem velocidade acima de 4000 m/s.

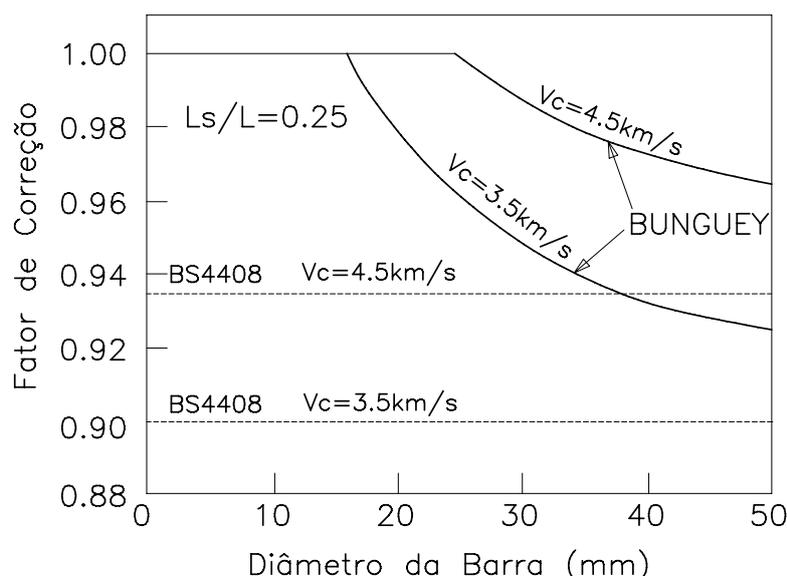


Figura 2.22 - Ábaco: Fator de correção versus Diâmetro da barra - Barras perpendiculares ao percurso da onda. Fonte: Bunguey (1984).

Estudos realizados por Dornelles *et al* (2004) sugerem que as informações existentes na literatura sobre os fatores de correlação com armaduras e fórmulas propostas para corrigir velocidades não devem ter caráter universal. No estudo foi verificado que as estimativas de velocidade no concreto sem armaduras (V_c) feitas através da Equação 2.5 a partir de medidas de velocidade (V_e) realizadas próximas a barras de aço são conservadoras, subestimando a velocidade real no concreto (V_c).

2.5 Aplicações

Segundo a NM 58 (1996) as principais aplicações do ultra-som são as seguintes:

- Determinação da uniformidade do concreto;
- Detecção da presença de vazios, fissuras e outras imperfeições;
- Estimativa da resistência à compressão do concreto, utilizando para tal, curvas de correlação apropriadas;

- Determinação do módulo de elasticidade dinâmico e do coeficiente de Poisson.

Bungey (1989) e Naik, Malhotra e Popovics (2004) acrescentam as seguintes aplicações:

- Monitoramento da evolução da resistência;
- Avaliação da deterioração do concreto por fogo, gelo e degelo ou ataque químico;
- Estudos relativos à hidratação do cimento com o tempo, ou deterioração.

2.5.1 Aplicação do Ultra-som para Avaliação das Propriedades Dinâmicas do Concreto.

Whitehurst (1966) cita teorias desenvolvidas por Love (1904), Timoshenko (1922), Lord Rayleigh (1945) e outros, segundo as quais certas propriedades dos materiais podem ser calculadas através dos resultados dos ensaios sônicos. Entre essas propriedades estão inclusos o módulo de deformação dinâmico e o coeficiente de Poisson.

A relação entre as constantes elásticas e a velocidade de onda ultrassônica foi mostrada no item 2.2.1. Manipulando as Equações 2.1 e 2.2, temos o módulo de deformação dinâmico, conforme a Equação 2.10.

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (2.10)$$

Segundo a BS 1881: Part 203 (1986), os valores de módulo de deformação (dinâmico ou estático), coeficiente de Poisson e densidade variam de ponto a ponto em uma estrutura de concreto. Estas propriedades são

obtidas através de ensaios de ressonância, porém muitas vezes não é possível realizar estes ensaios em elementos estruturais de forma a determinar confiavelmente os valores dessas propriedades. No entanto, é possível usar relações empíricas para estimar valores dos módulos de deformações estático e dinâmico pelas medidas de velocidade de propagação de onda ultra-sônica feitas em qualquer ponto da estrutura. Essas relações são mostradas na Tabela 2.8 e são aplicáveis a concretos moldados com vários tipos de agregados naturais normalmente utilizados. A estimativa de módulo de deformação obtida dessa tabela tem precisão de $\pm 10\%$.

Tabela 2.8 – Relação empírica entre os módulos de deformação dinâmico e estático e a velocidade ultra-sônica. Fonte: BS 1881: Part 203 (1986).

VELOCIDADE ULTRA-SÔNICA (m/s)	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO (GPa)	
	DINÂMICO	ESTÁTICO
3600	24	13
3800	26	15
4000	29	18
4200	32	22
4400	36	27
4600	42	34
4800	49	43
5000	58	52

O módulo de deformação dinâmico corresponde a uma deformação instantânea pequena, sendo definido pelo módulo estático tangente inicial. Seu valor é geralmente 20, 30 e 40% maior que o módulo estático de deformação para concretos de alta (acima de 40 MPa), média ($20 \text{ MPa} < R < 40 \text{ MPa}$) e baixa (menor que 20 MPa) resistências, respectivamente (RODRIGUES, 2003).

Em estruturas de concreto suscetíveis à ação de ciclos repetidos de gelo e degelo, ataques químicos, terremotos ou cargas de impacto, devido à rápida velocidade de carregamento, o concreto não tem tempo de se deformar, da mesma forma que se deformaria sob condições de carregamento lento. Nesses casos, com a finalidade de determinar as mudanças ocorridas na estrutura, podem ser feitos ensaios para determinação da frequência fundamental de ressonância, a partir da qual se calcula o módulo de deformação dinâmico do concreto. (VASCONCELOS e GIAMMUSSO, 1998).

2.5.2 Aplicação do Ultra-som para Avaliação da Qualidade do Concreto

Os ensaios ultra-sônicos caracterizam o material, sua integridade e outras propriedades físicas por meio de ondas de alta frequência, tornando-se uma técnica extensamente usada para controle de qualidade, detecção de defeitos, medida de espessuras ou podem caracterizar os materiais envolvidos no processo. Nos setores petroquímico, siderúrgico, naval, aeronáutico e nuclear, seu uso é bastante difundido, seja na inspeção de soldas, avaliação do efeito da corrosão, detecção de defeitos laminares em chapas planas, entre outros (RODRIGUES, 2003).

No concreto, o ensaio ultra-sônico pode ser usado no controle de desforma, na verificação da qualidade da estrutura, na averiguação da qualidade da mão-de-obra através da presença de falhas de concretagem e na avaliação de danos provocados por incêndio ou ataque químico. O princípio básico para a correta interpretação dos resultados obtidos com o uso do ultra-som é o conhecimento prévio da influência do tipo de materiais, do proporcionamento dos mesmos no concreto, da idade, do nível de resistência e das condições de umidade, temperatura e presença de armaduras sobre estes resultados (HAMASSAKI, 1986; MENEGHETTI, 1999).

No Brasil existe uma quantidade considerável de estudos sobre o uso do ultra-som. Boa parte destes estudos relacionou o uso do ultra-som com resistência à compressão do concreto e homogeneidade (HAMASSAKI, 1986; REPETTE, 1991; ALMEIDA, 1993; MENEGUETTI, 1999; LORENZI, 2000; EVANGELISTA, 2002; PINTO *et al*, 2003; GRULLÓN *et al*, 2004; PINTO *et al*, 2004a; PINTO *et al*, 2004b; MACHADO, 2005; CÂMARA, 2006). Alguns autores ainda estudaram a detecção de falhas internas e não homogeneidades no concreto (LORENZI *et al*, 2004, DORNELLES *et al*, 2005).

2.5.2.1. Detecção de Falhas de Concretagem

A presença de falhas, fissuras ou vazios no interior do concreto ocasionam a obstrução da trajetória de propagação da onda incidente, deslocando-a através da periferia do defeito, resultando em maior tempo de propagação. Esse efeito pode ser usado para localização de defeitos maiores que 100 mm de diâmetro ou profundidade, já que defeitos menores geralmente não ocasionam efeitos significativos sobre o tempo de propagação (BS 1881 Part 203, 1986).

Bauer (1987) cita o procedimento proposto por Facaoaru (1969) para determinação da menor dimensão “*b*” da projeção transversal da área da falha, através da medição dos tempos de percurso da onda na região da falha e em outro trecho de concreto íntegro, conforme a Figura 2.23. Deve-se atentar que o procedimento supõe que o diâmetro “*d*” dos transdutores seja menor que a dimensão “*b*”.

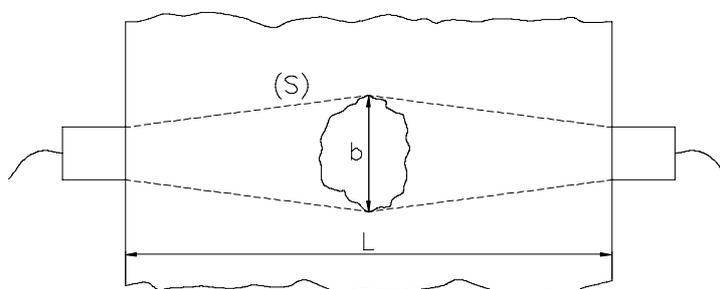


Figura 2.23 – Esquema para determinação da menor dimensão de falhas internas do concreto. Fonte: Bauer (1987).

Assim sendo, tomando “*t₁*” como o tempo de propagação no concreto íntegro, tem-se a Equação 2.11.

$$t_1 = \frac{L}{V} \quad (2.11)$$

E tendo “ t_2 ” como o tempo de propagação da onda ultra-sônica através da falha, obtém-se a Equação 2.12.

$$t_2 = \frac{S}{V} \quad (2.12)$$

Tem-se:

$$\frac{t_2}{t_1} = \sqrt{\frac{1+(b-d)^2}{L^2}} \quad (2.13)$$

Bauer (1987) ressalta que a aplicação dessa expressão prevê a existência de falhas relativamente grandes, visto que a prática indica variações de até 5% nos valores de velocidade em uma mesma peça de concreto sem que, necessariamente, existam falhas internas.

Utilizando o mesmo procedimento descrito acima Dornelles *et al* (2005) propuseram um ábaco para detecção de falhas internas de concretagem utilizando o modo de transmissão direta. A Figura 2.24 apresenta o ábaco proposto pelos autores, onde no eixo das ordenadas, α é a relação entre a velocidade de propagação através do concreto com falha interna e a velocidade através do concreto íntegro; no eixo das abscissas, “ a ” é a relação entre a dimensão da falha e a dimensão da peça (distância entre transdutores). Os autores afirmam que o ábaco e o procedimento são aplicáveis. Porém sua eficiência está ligada a uma escolha de pontos adequados para a realização das leituras, feita através de um reticulado condizente com a dimensão da região defeituosa.

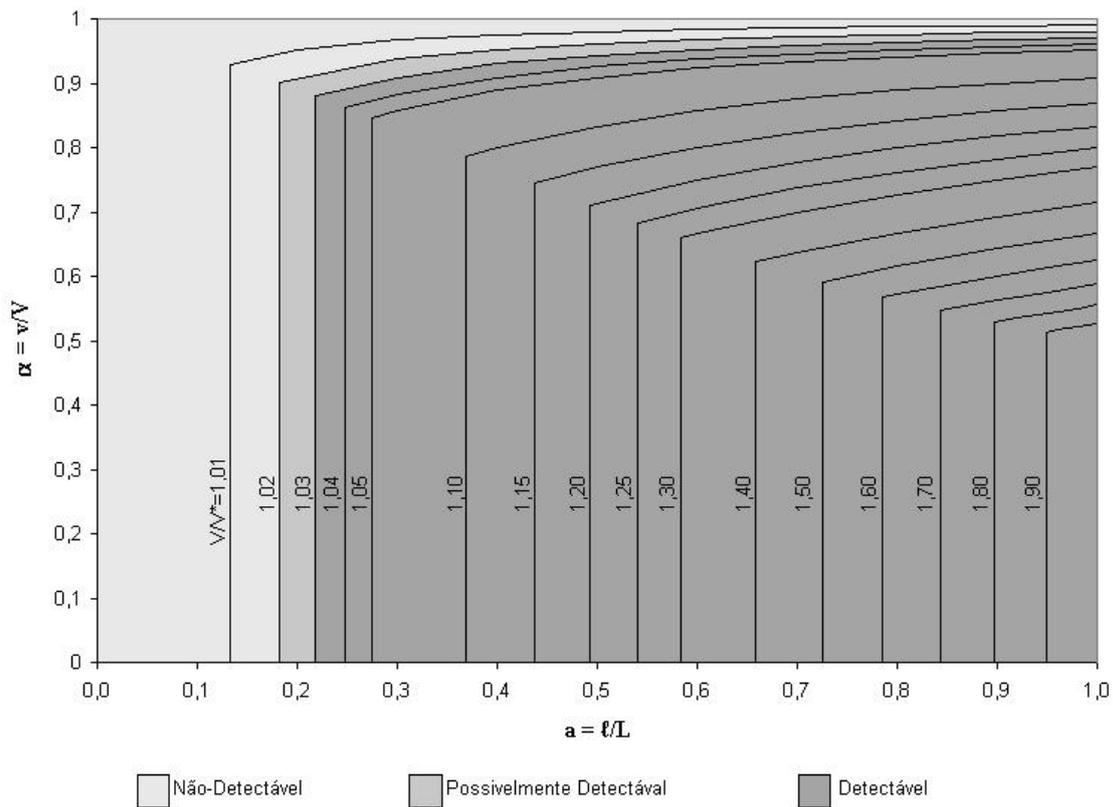


Figura 2.24 - Ábaco para detecção de falhas internas de concretagem.
Fonte: Dornelles et al (2005).

Knab, Blessing e Clifton (1983) realizaram estudo em cubos de concreto de aresta 152 mm com um vazio, simulando uma fissura de abertura 0,05 mm e profundidades variáveis de 19, 38 e 57 mm. Utilizando o procedimento descrito anteriormente, os autores compararam medidas pelo modo de transmissão direto nos cubos de concreto posicionando os transdutores paralelos à fissura (concreto íntegro – retas EF e GH da Figura 2.25) e transdutores transversais à fissura (retas AB e CD da Figura 2.25) os pesquisadores concluíram que as duas maiores profundidades estudadas 38 mm e 57 mm puderam ser detectadas e estimadas com confiança.

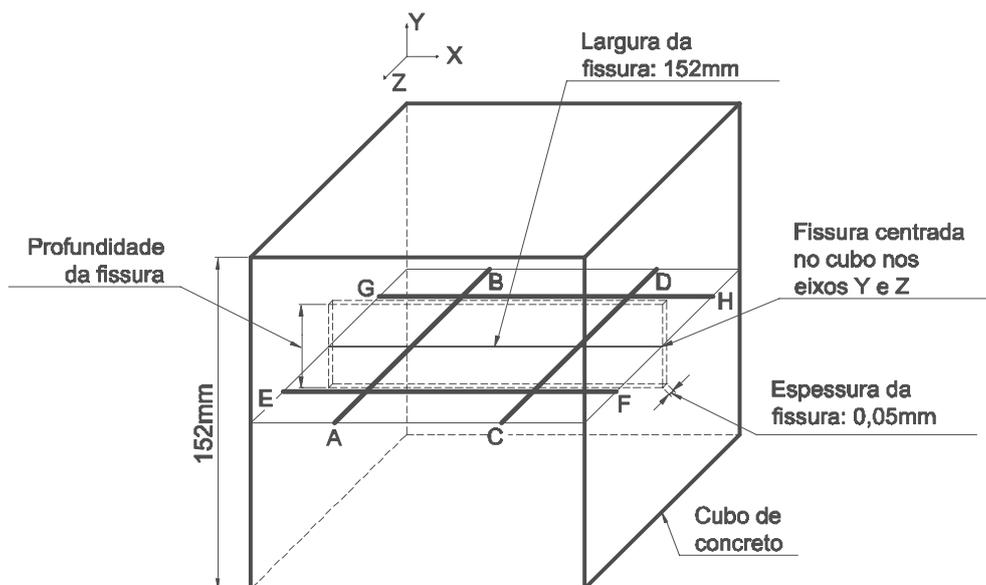


Figura 2.25 – Esquema das leituras para detectar fissuras pelo modo de transmissão direto. Fonte: Knab, Blessing e Clifton (1983).

2.5.2.2. Estimativa da Profundidade de Fissuras

Autores e normas internacionais afirmam que é possível estimar a profundidade de fissuras superficiais através de leituras de tempo de propagação de onda ultra-sônica pelo modo de transmissão indireto (RILEM, NDT1, 1972; BS 1881: Part 203, 1986; BUNGEY, 1989; EN-ISO 8047, 1994; PUNDIT MANUAL, 1994; ROSSEL *et al*, 2000; NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004, entre outros). Porém, existe pouca informação disponível sobre a aplicação prática deste procedimento.

Existem dois modelos matemáticos semelhantes propostos na literatura, neste trabalho vai se adotar o nome de Modelo 1 para o modelo proposto por Bungey (1989), entre outros, e o Modelo 2 proposto pela BS 1881: Part 203 (1986).

- **Modelo 1:**

A profundidade de uma fissura perpendicular à superfície de concreto pode ser estimada utilizando leituras de ultra-som no modo de transmissão indireto, como mostra a Figura 2.26 (BUNGEY, 1989). No caso estando os transdutores equidistantes da fissura superficial e adotada uma velocidade para o concreto íntegro “ V_c ”, tem-se:

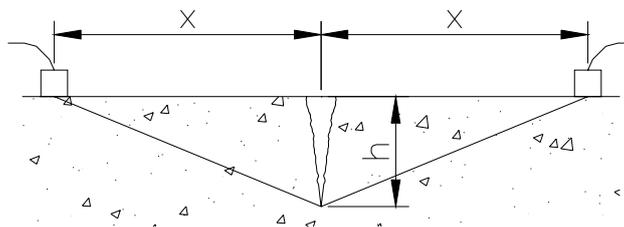


Figura 2.26 – Medida da profundidade de uma fissura. Fonte: Bungey (1989).

Percurso sem a fissura (L_c):

$$L_c = 2x \quad (2.14)$$

Percurso desviando a fissura “ L_f ”:

$$L_f = 2\sqrt{x^2 + h^2} \quad (2.15)$$

Tempo de propagação sem a fissura “ T_c ”:

$$T_c = \frac{2x}{V_c} \quad (2.16)$$

Tempo de propagação desviando a fissura “ T_f ”:

$$T_f = \frac{2\sqrt{x^2 + h^2}}{V_c} \quad (2.17)$$

Tomando a mesma velocidade “ V_c ” para os casos com e sem a fissura, substituindo “ $V_c = 2x/T_c$ ” e manipulando a Equação 2.17 tem-se:

$$h = \left(\frac{x}{T_c} \right) \sqrt{T_f^2 - T_c^2} \quad (2.18)$$

Onde:

h = profundidade da fissura;

x = distância do transdutor à fissura;

T_f = tempo de propagação ao redor da fissura;

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

Esta estimativa somente é válida admitindo-se que a velocidade é a mesma nas leituras pelo modo de transmissão indireto em volta de uma fissura e em uma região de concreto íntegro. Esta suposição pode levar a erros na estimativa, pois o pulso que contorna a fissura 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 2.26 o pulso caminha linearmente do transdutor-emissor até a parte mais profunda da fissura e em seguida refrata até o transmissor-receptor. Entretanto o real percurso do pulso não é linear e existe perda de energia nas difrações ao longo do percurso (BUNGEY, 1989).

Bungey (1989) afirma que as fissuras superficiais podem ser estimadas com uma precisão de $\pm 15\%$ por este método devido aos erros inerentes às leituras pelo modo de transmissão indireto.

- **Modelo 2:**

A BS 1881: Part 203 (1986) descreve um procedimento semelhante, porém para um arranjo combinado dos transdutores simétricos a fissura de tal forma que não se necessite estimar uma velocidade pelo modo de transmissão indireto. O procedimento consiste em posicionar os transdutores emissor e receptor simétricos à fissura superficial a uma distância “x”, como na Figura 2.26, e anotar o tempo de propagação “ T_1 ”, em seguida posicionar os transdutores eqüidistantes da fissura de “ $2x$ ” e anotar o tempo de propagação “ T_2 ”. Admitindo que o pulso percorreu pelo concreto o menor caminho entre os dois transdutores passando pelo fundo da fissura com a mesma velocidade “ V ” tem-se uma modificação da Equação 2.17 para a Equação 2.19 onde o “ T_1 ” é dado por:

$$T_1 = \frac{2\sqrt{x^2 + h^2}}{V} \quad (2.19)$$

O tempo de transmissão “ T_2 ” obtido com o dobro da distância entre transdutores pode ser expresso como uma modificação da Equação 2.17 para a Equação 2.20:

$$T_2 = \frac{2\sqrt{4x^2 + h^2}}{V} \quad (2.20)$$

Tomando a mesma velocidade “ V ”, e igualando as Equações 2.19 e 2.20 de forma a eliminar “ V ” tem-se:

$$h = x \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (2.21)$$

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

Pode-se fazer uma generalização da Equação 2.21, tomando distâncias múltiplas de “x” para os tempos “ T_1 ” e “ T_2 ”, como sendo “a” e “b” respectivamente, com “ $a < b$ ”, assim tem-se:

$$h = x \sqrt{\frac{b^2 T_1^2 - a^2 T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (2.22)$$

Pode-se verificar se a fissura é ou não perpendicular à superfície posicionando os transdutores próximos a fissura, mantendo o emissor fixo e movendo o receptor para mais longe da fissura como mostra a Figura 2.27. 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 fissura é inclinada no sentido do emissor para o receptor. Porém pode também ser indicativo de que a fissura é muito profunda. Para verificar, basta inverter os transdutores. Se o tempo obtido para a leitura com os transdutores mais próximos for menor do que com eles afastados, a fissura é mesmo inclinada no sentido da leitura anterior. Caso contrário, a fissura pode ser perpendicular à superfície, porém muito profunda (BS 1881: Part 203, 1986).

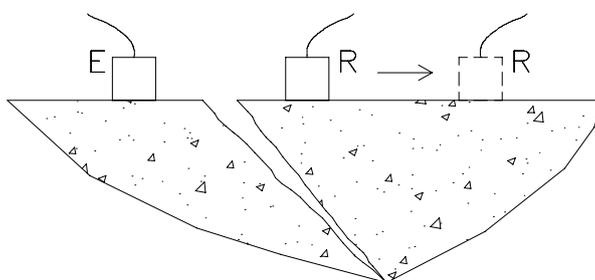


Figura 2.27 – Leitura de ultra-som ao redor de uma fissura inclinada.
Fonte: BS 1881: Part 203 (1986).

Sansalone *et al* (1998) utilizaram o método do Eco-Impacto para estimar a profundidade de fissuras superficiais de geometria controlada. Foram estudadas fissuras com profundidades de até 200 mm. Os autores conseguiram resultados muito próximos da geometria real, porém relatam que a posição do ponto de impacto e recebimento do sinal devem estar mais afastados da lateral da fissura do que da profundidade, caso contrário a onda contorna a lateral da fissura (menor percurso) e a estimativa da profundidade pode ser confundida com a largura da fissura. Os autores compararam os resultados com medidas de velocidade com aparelho de ultra-som nas mesmas posições do ensaio com o Eco-Impacto (transdutores posicionados a 50mm da fissura superficial) e relatam que não conseguiram estimativas precisas provavelmente pelas características do pulso e pela técnica usada para determinar o tempo de propagação.

Sakata e Ohtsu (1995), estudaram através do espectro de freqüências ultra-sônicas a estimativa de fissuras superficiais induzidas 0 a 90 mm e relatam que a técnica é capaz de estimar a profundidade destas fissuras com precisão de 10 mm, com freqüências de 0 a 10 kHz.

Popovics *et al* (2000), utilizando transmissão de ondas de superfície, conseguiram detectar e estimar com precisão profundidades de fissuras até 100 mm induzidas por flexão em concretos de diferentes composições. Os autores observam que a intensidade do sinal em geral diminui com o aumento da profundidade das fissuras. Foram utilizadas freqüência de 0 a 80 kHz, contudo nas freqüências mais altas os resultados foram dispersos e confusos.

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

A principal motivação deste trabalho foi verificar se o método do ultra-som é realmente capaz de estimar profundidade de fissuras, trincas e fendas superficiais induzidas de geometria conhecida em moldes de concreto.

3 TRATAMENTO DE FISSURAS

3.1 Introdução

Neste capítulo utilizar-se-á o termo fissuras pois não está se tratando das falhas superficiais induzidas em moldes de concreto confeccionados em laboratório e sim do fenômeno fissuração, dos tipos de fissuras e das alternativas de reparo para estruturas de concreto fissuradas.

Devido à aplicação de cargas repetidas, fissuras podem aparecer e se propagar até limites que levem ao colapso da estrutura. Quando mais profundas forem as fissuras, maior será a concentração de esforços induzida por estas. A resistência de uma estrutura decresce, devido à diminuição da inércia da seção fissurada, podendo diminuir a níveis menores do que a resistência de projeto (ISSA e DEBS, 2005).

Nos levantamentos realizados no Brasil visando verificar as manifestações patológicas mais incidentes nas construções, pode-se observar que a fissuração está presente como um dos de maior incidência. Em levantamento realizado por Ioshimoto (1985), pesquisador do IPT- SP, em 36 conjuntos habitacionais do estado de São Paulo, pode-se observar que mesmo em edifícios de diferentes idades, a fissuração sempre aparece com uma incidência significativa, não importando o tipo de construção. Os dados deste estudo são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Distribuição de manifestações patológicas encontradas em pesquisa realizada pelo IPT. Fonte: Ioshimoto (1985).

Tipo de Edificação	Idade	Umidade	Fissuras	Descolamento de Revestimento
Casas Térreas	1 a 3 anos	42%	29%	29%
	4 a 7 anos	50%	25%	25%
	8 anos	37%	35%	28%
Apartamentos	1 a 3 anos	52%	35%	13%
	4 a 7 anos	86%	14%	-
	8 anos	82%	12%	6%

Também no Rio Grande do Sul foi realizado, por Dal Molin (1988), um estudo de caso das manifestações patológicas mais incidentes entre os 1615 casos atendidos pela Fundação de Ciência e Tecnologia CIENTEC no período de 1977 a 1986 onde se pode constatar que 66,01 % dos casos atendidos eram casos de fissuração, conforme Figura 3.1.

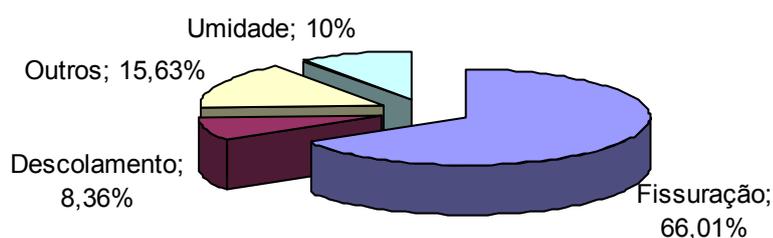


Figura 3.1 – Incidência relativa dos diferentes tipos de manifestações patológicas atendidas pelo CIENTEC. Fonte: Dal Molin (1988).

Outra pesquisa, realizada por Reygaerts, Gasper e Dutordir (1976) *apud* Figueredo (1989) na Bélgica entre 1976 e 1977 chegou aos percentuais de ocorrência conforme Figura 3.2.

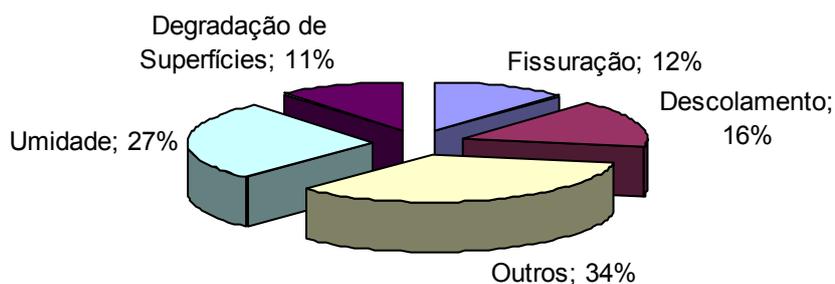


Figura 3.2 – Incidência relativa dos diferentes tipos de manifestações patológicas na Bélgica entre 1976 e 1977. Fonte: Reygaerts, Gasper e Dutordir (1976) *apud* Figueredo (1989).

Diante destes resultados pode-se afirmar, que a fissuração é um fator importante na vida útil das estruturas, e pelos levantamentos supracitados possui um percentual alto nas construções, o que leva estas estruturas à diminuição de sua capacidade resistente e principalmente a redução de sua

vida útil. Desta forma é importante entender os fenômenos que envolvem a fissuração no concreto para saber como corrigir elementos de concreto danificados por fissuras.

A importância da terapia das fissuras passa fundamentalmente por dois aspectos. O primeiro é que sua correção envolve altos gastos e pessoal especializado pois a fissura é um fator desencadeante de outros problemas, os recursos necessários para sua correção aumentam cada vez que ela é protelada. De acordo com Figueredo *et al* (2003), pode-se afirmar que as correções serão mais duráveis, mais efetivas, mais fáceis de executar e muito mais baratas quanto mais cedo forem executadas. A demonstração mais expressiva dessa afirmação é a chamada “Lei de Sitter”, que mostra os custos crescendo segundo uma progressão geométrica. Dividindo-se as etapas construtivas em quatro períodos correspondentes ao projeto, à execução propriamente dita, à manutenção preventiva efetuada antes dos primeiros três anos e à manutenção corretiva efetuada após o surgimento dos problemas, a cada uma corresponderá um custo que segue uma progressão geométrica de razão cinco conforme Figura 3.3. O segundo é o fator estético e o de sensação de pouca estabilidade que apresenta a peça fissurada, gerando insegurança e insatisfação psicológica do usuário.

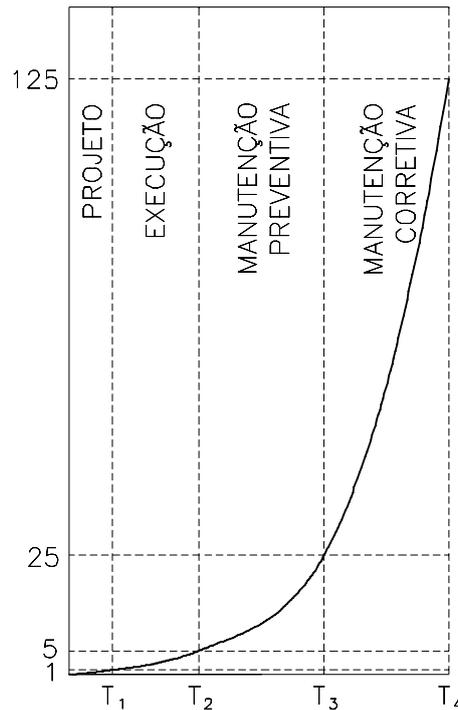


Figura 3.3 – Lei de Evolução de custos.
Fonte: Sitter (1984) apud Figueredo et al (2003).

Para Bauer (1987), as fissuras poderiam ser evitadas ou pelo menos minimizadas, desde que atendidas as normas gerais sobre concreto armado estabelecidas pela Norma de Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento - NBR 6118 (2003).

Algumas fissuras, dependendo da abertura 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 fissura como nociva quando sua abertura na superfície do concreto ultrapassa os seguintes valores de acordo com a 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	Abertura Máxima Característica
Fraca	0,4 mm
Moderada ou Forte	0,3 mm
Muito Forte	0,2 mm

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

Uma forma de verificar a atividade de uma fissura é a utilização de selos de gesso de aproximadamente 3 mm de espessura e com as dimensões de um cartão de apresentação. Esse selo fica aderido às paredes laterais da fissura, como mostra a Figura 3.4a, em posição transversal ao eixo da fissura. Como a resistência à tração é muito baixa, qualquer movimentação da estrutura é suficiente para que o selo se rompa. Outra forma, mais rigorosa, para verificar a movimentação de fissuras, consiste em colocar duas referências fixas em ambos os lados da fissura. Essas referências podem ser plaquetas de metal com uma semi-esfera soldada no seu centro, onde são encaixados os extremos de um alongômetro que aprecia centésimos de milímetros de movimentação. As plaquetas são aderidas com adesivo a base de epóxi. O esquema do procedimento está na Figura 3.4b (REPETTE, 1991).

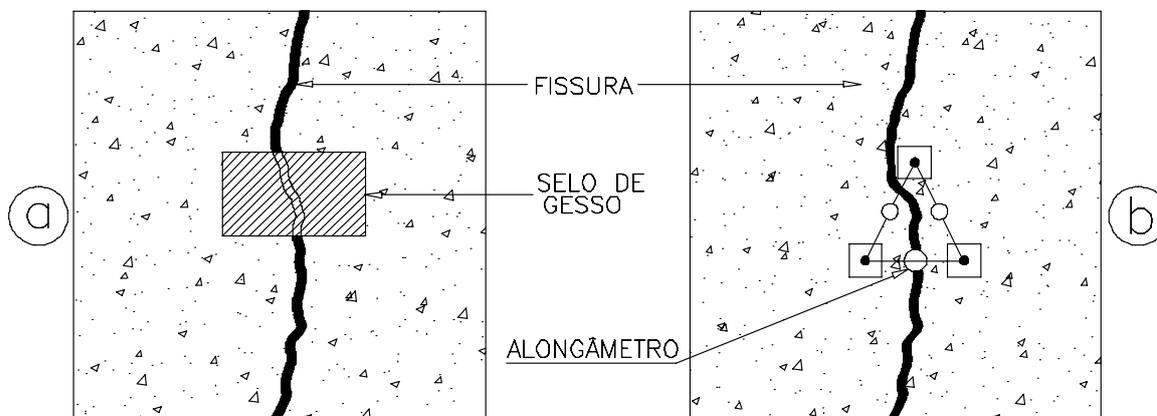


Figura 3.4 – Selo de gesso e alongômetro para a verificação de movimentação de fissuras. Fonte: Repette (1991).

A abertura da fissura pode ser medida com o emprego do fissurômetro, conforme Figura 3.5.



Figura 3.5 – Fissurômetro: medida da abertura da fissura.

3.2 Tipos de Fissuras

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

As fissuras 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 das fissuras foi descrita na Tabela 1.1.

3.2.1 Fissuras Ativas

São denominadas fissuras ativas ou vivas, aquelas que apresentam movimentos especialmente os de variação da abertura e do comprimento. Neste grupo se incluem as fissuras que, ao longo de sua vida na estrutura danificada, terão sempre movimentos, sem que isso represente, após ser tratada, um perigo à segurança da estrutura.

Na seqüência serão apresentados alguns fatores que causam fissuras ativas como: variação térmica, retração por secagem ou hidráulica, cargas dinâmicas, corrosão de armadura, reações expansivas com sulfatos e reações álcali-silicatos (FIGUEREDO, 1989; REPETTE, 1991).

3.2.1.1. Variação Térmica

Das fissuras originadas devido a variações térmicas, apenas as decorrentes de mudanças nas condições ambientais se enquadram na classificação de fissuras ativas.

As decorrentes do calor de hidratação do cimento, que eleva a temperatura do concreto produzindo gradientes térmicos entre as suas diferentes camadas, e as devidas a incêndios, são classificadas como passivas depois de estabilizadas (FIGUEREDO, 1989).

3.2.1.2. Retração por Secagem

A retração por secagem provém da contração volumétrica da pasta endurecida, devido à saída de água do concreto conservado em ar não saturado. Uma parte desta retração é irreversível, enquanto outra, decorrente da conservação do concreto em ambiente ora seco, ora úmido, é variável (DAL MOLIN, 1988).

A Figura 3.6, mostra como a umidade relativa do ar exerce influência sobre a retração do concreto, podendo-se observar que o concreto retrai no ar não saturado e expande em menor escala, quando a umidade é de 100%.

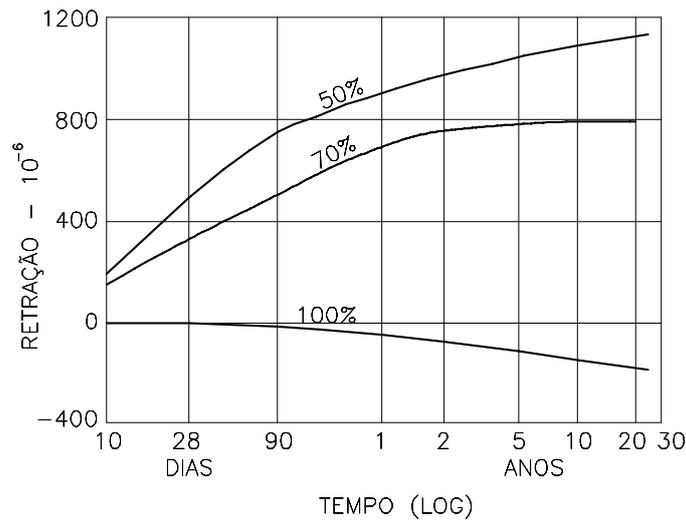


Figura 3.6 – Retração em função do tempo de concretos conservados em diferentes umidades relativas. Fonte: Troxell *et al* (1958) *apud* Neville (1997).

3.2.1.3. Cargas Dinâmicas

Neste tipo de fissura, podem-se enquadrar as fissuras de flexão provocadas por ações dinâmicas sobre elementos estruturais. Por exemplo, fissuras em vigas de pontes. Essas fissuras são de caráter ativo devido à movimentação das cargas que atuam sobre a estrutura (FIGUEREDO, 1989).

3.2.1.4. Corrosão de Armadura, Reações Expansivas com Sulfatos e Reações Alkali-silicatos.

Estes tipos de fissuras de origem química ou eletro-química são consideradas ativas progressivas. No entanto as medidas corretivas para esses casos não passam por técnicas de correção das fissuras propriamente ditas, e sim por técnicas de reparo, uma vez que para suas correções, quando possível é necessário o descascamento do concreto e tratamento da armadura. Dependendo da intensidade das reações, o concreto deve ser totalmente refeito (FIGUEREDO, 1989).

3.2.2 Fissuras Passivas

São denominadas fissuras passivas ou mortas àquelas que estão estabilizadas, que apresentam o mesmo comprimento e abertura. São fissuras originadas por fatores que, ou já foram eliminados antes da correção, como por exemplo as devido a problemas estruturais tais como falta de rigidez, má qualidade do concreto ou falta de armadura, ou ainda fissuras de retração plástica do concreto.

As fissuras que possuem atividade temporária, como as de retração por secagem, que após certo tempo adquirem um caráter passivo, podem ser consideradas ativas.

Na seqüência serão apresentados alguns fatores que causam fissuras passivas como: assentamento plástico, dessecação superficial, retração química ou intrínseca, movimentação das fôrmas, variação térmica e sobrecargas.

3.2.2.1. 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 a armadura ou aos agregados graúdos, que impeça a livre movimentação da massa para a parte inferior da forma, poderão se produzir fissuras adjacentes ao elemento restringidor, conforme Figura 3.7. Segundo Metha e Moteiro (2000), as fissuras de assentamento plástico ocorrem quando a exsudação e o assentamento são excessivos e existe alguma restrição ao assentamento. Deve-se notar que estas fissuras são independentes da evaporação e da secagem da superfície.

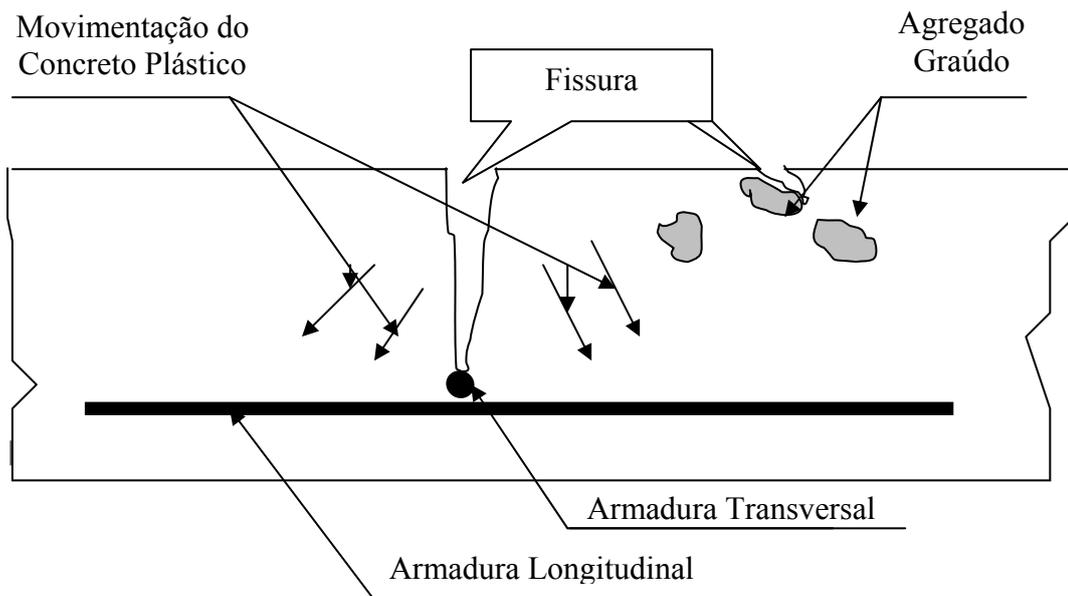


Figura 3.7 – Fissura pós assentamento plástico no concreto devido à restrição da armadura e do agregado graúdo. Adaptado de Padaratz (2005).

De acordo com o CEB (1985), vários são os mecanismos que podem causar fissuras no concreto jovem. Na Figura 3.8, pode-se observar os vários tipos de fissuras relatadas, de (A) a (F), que aparecem nas primeiras idades do concreto. As fissuras (A), (B) e (C) são causadas por assentamento plástico, que ocorrem acima das armaduras normalmente em seções profundas ou quando há mudança de seção, podem aparecer de dez minutos a até três horas após a concretagem. As fissuras (D), (E) e (F) são causadas por retração autógena ou por retração térmica, que podem ocorrer diagonalmente, randomicamente ou sobre a armadura, em grandes elementos planos, e aparecem de trinta minutos a seis horas após a concretagem.

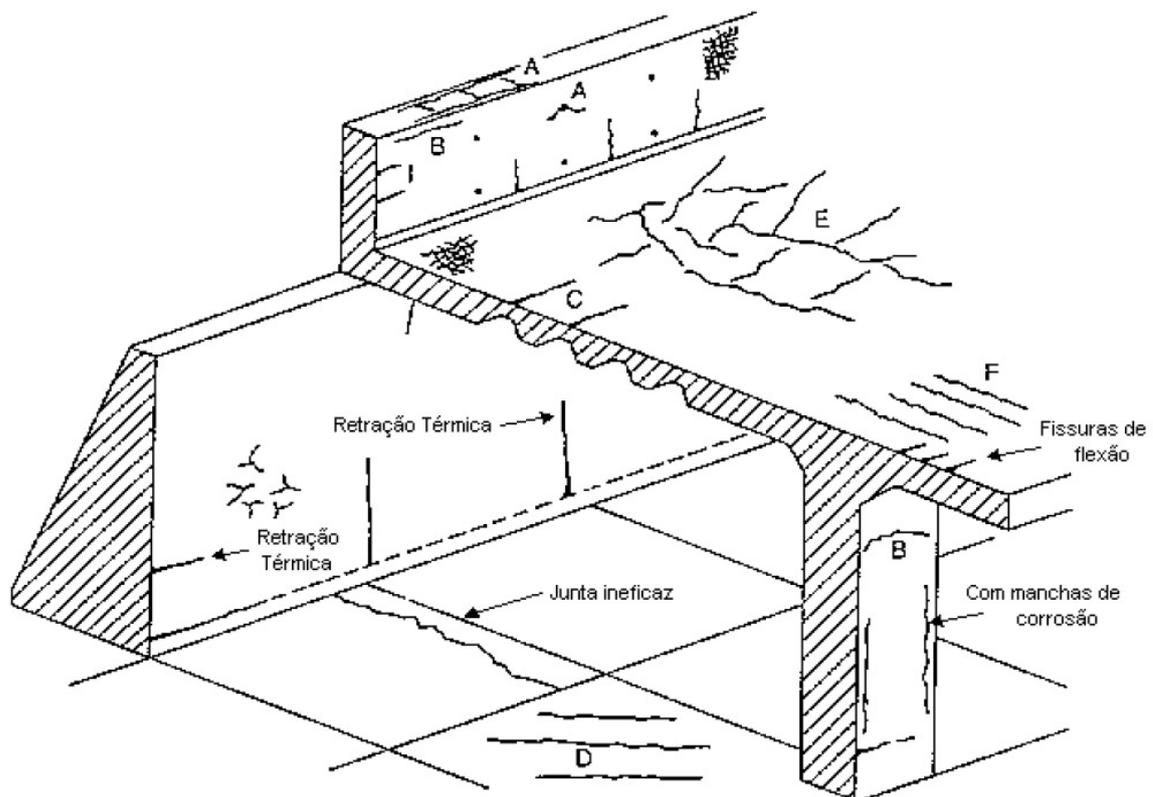


Figura 3.8 – Tipos de Fissuras. Fonte: CEB (1985).

3.2.2.2. Dessecação Superficial

Dessecação superficial produz fissuras passivas devido a rápida evaporação da água de amassamento do concreto ou ainda pela exagerada absorção dos agregados ou fôrmas. A água exsudada evapora em maior ou menor velocidade de acordo com a temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Dal Molin (1988) afirma que quanto maior a superfície livre/volume do elemento, maior são as conseqüências da dessecação superficial. As faces livres que não possuam fôrmas tendem a fissurar com maior facilidade devido ao contato com o ar, como no caso de faces superiores de lajes. Essas fissuras aparecem entre trinta minutos e seis horas após o lançamento do concreto, não apresentando modificação após este período.

3.2.2.3. 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 fissuras no concreto (BORGES, 2002).

3.2.2.4. Movimentação das Fôrmas

Todo o movimento da fôrma que se produzir entre o momento em que o concreto começa a perder fluidez e o momento do início da pega, provoca o aparecimento de fissuras (PADARATZ, 2005).

A Figura 3.9 mostra possíveis movimentos das fôrmas e o local onde as fissuras aparecem. Observa-se como se formam fissuras na superfície do concreto devido ao deslocamento da base de fôrma (a), fissura interna devido ao deslocamento da fôrma lateral (b) e fissura na superfície devido a deslocamento da fôrma lateral (c).

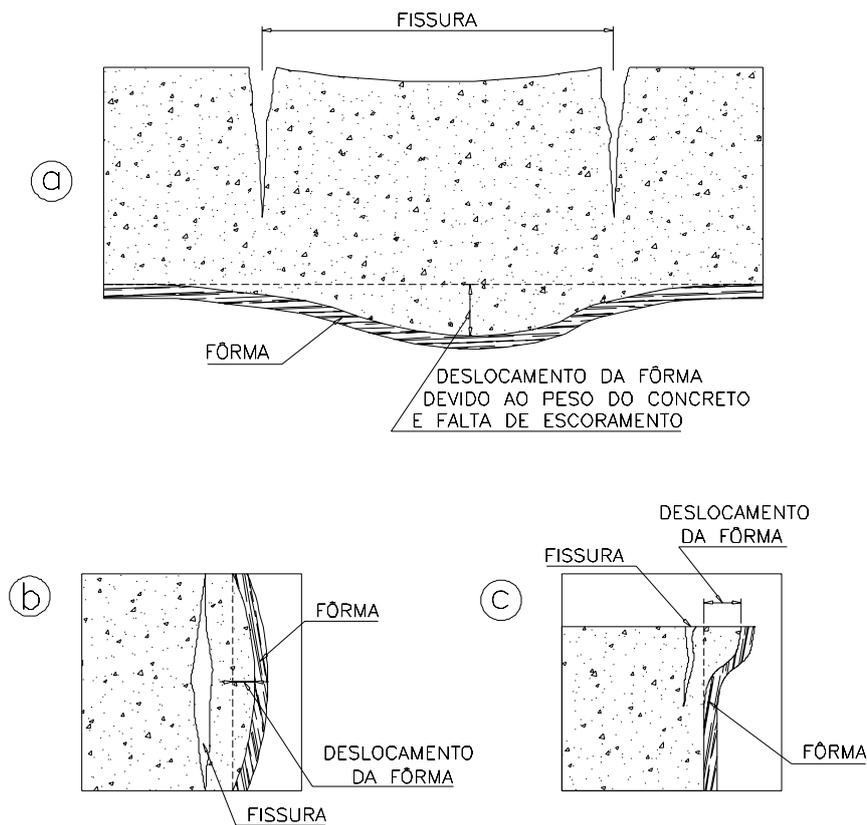


Figura 3.9 – Fissuras no concreto devido ao deslocamento das fôrmas.
Fonte: Padaratz (2005).

3.2.2.5. Variação Térmica

As fissuras 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).

3.2.2.6. Sobrecargas

A atuação de 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).

A Figura 3.10 apresenta alguns tipos de fissuras que têm como causa a ação de sobrecargas.

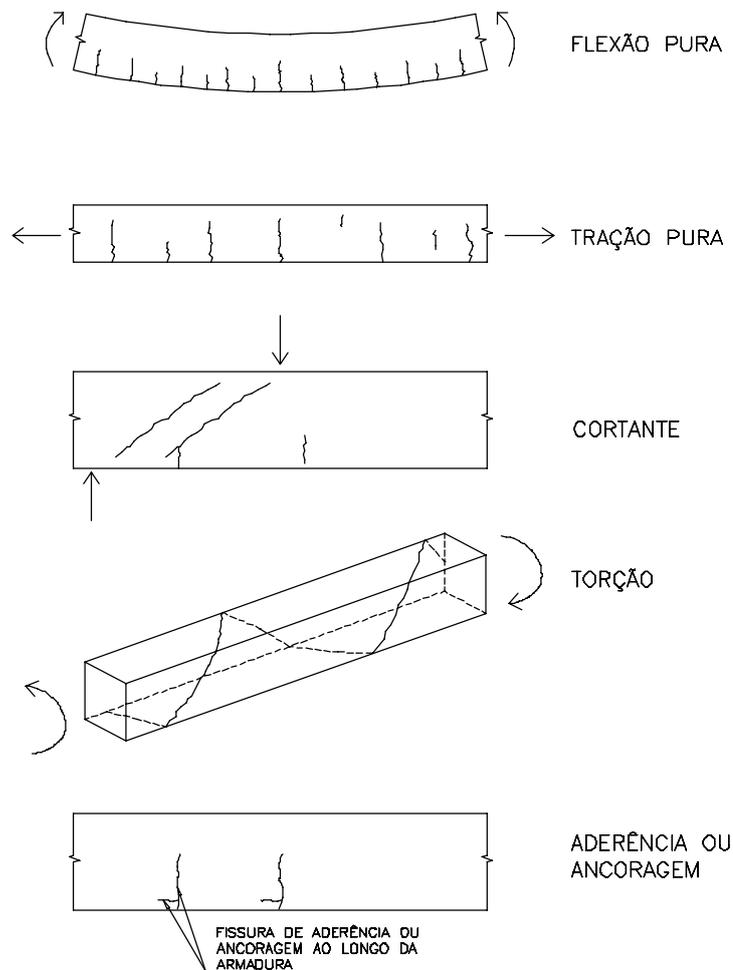


Figura 3.10 – Fissuras provocadas por esforços mecânicos de flexão pura, tração pura, constante (cisalhamento), torção e aderência. Fonte: CEB (1985).

3.3 Reparo de Fissuras

O reparo apropriado das fissuras depende da identificação das causas da fissuração e da seleção adequada dos procedimentos de reparo. Uma fissura no concreto não deve ser reparada sem que antes se conheçam todos os fatores que envolvem o problema e sem que se faça uma reflexão sobre

esses fatores, sob pena de se realizar trabalhos inapropriados, desnecessários e ineficazes (FIGUEREDO, 1989).

Os procedimentos de reparo a longo prazo, bem sucedidos, devem resolver tanto as causas quanto as fissuras (ISSA e DEBS, 2005).

Injeção de fissuras é um método de reparo que consiste em injetar um material adesivo de baixa viscosidade, que depois de endurecido permite recuperar as propriedades originais da estrutura (QUESADA, 2003).

As técnicas para injeção de fissuras são conhecidas há várias décadas, o que tem mudado com o advento da tecnologia é a evolução dos materiais para injeção e equipamentos para as suas aplicações. De acordo com Takagi e Almeida (2002), nas últimas décadas os fabricantes da indústria química para construção vêm desenvolvendo diversos sistemas para tratamento de fissuras através de injeções químicas, fixando assim novos padrões de desempenho e confiabilidade. Além disto, também as tecnologias de aplicação evoluíram bastante. As injeções químicas previnem a penetração de agentes agressivos e protegem as estruturas de concreto, garantindo assim sua durabilidade.

Os critérios para a escolha dos produtos a serem injetados devem levar em conta o tipo da fissura, as condições de trabalho do produto endurecido, a temperatura e as condições da obra, garantindo estabilidade enquanto o produto ainda está na forma líquida, sem que reação de polimerização entre os componentes químicos esteja completa.

Rocha (2006) afirma que a escolha da resina apropriada para o tipo de fissura que se pretende tratar é de fundamental importância. Fissuras são redes complexas que possuem cavidades principais, secundárias, terciárias, etc., que exigem, para um total preenchimento, baixas viscosidades. Ao utilizar uma resina de viscosidade alta, corre-se o risco de preencher apenas a cavidade principal da fissura, bloqueando e deixando sem tratamento as cavidades secundárias e terciárias da fissura.

Atualmente existem no mercado inúmeros produtos e procedimentos para recuperação utilizados para obras de concreto armado e as empresas que trabalham neste setor encarregam-se de lançar, a todo instante, novos produtos e novos procedimentos.

Basicamente a escolha dos produtos para fissuras ativas ou passivas está na flexibilidade do produto final endurecido.

A seleção do tipo de resina a ser utilizada deverá contemplar basicamente três aspectos, além das garantias de qualidade básicas (ausência de retração, aderência e resistência mecânica), sendo função direta da analogia do quadro fissuratório com o qual se está lidando:

- Viscosidade;
- Módulo de elasticidade;
- *Pot-life* da mistura.

Em termos de viscosidade, Pimentel (1986) sugere a Tabela 3.4 para uma temperatura de 20° C.

Tabela 3.3 – Viscosidade recomendada para diferentes aberturas das fissuras.

Abertura (ω)	Viscosidade
$\omega \leq 0,2$ mm	em torno de 100 cps
$0,2$ mm $\leq \omega \leq 0,6$ mm	até 500 cps
$0,6$ mm $\leq \omega \leq 3,0$ mm	até 1500 cps

Quanto ao módulo de elasticidade da resina, Takagi e Almeida (2002) sugerem resinas de poliuretano para casos em que se precise de um produto endurecido flexível, como o caso de fissuras ativas. Enquanto resinas epóxi e microcimento são recomendados para tratamento de fissuras passivas.

O *Pot-life*, tempo de uso, também chamado de coeficiente de polimerização, é o tempo decorrido a partir do início da mistura dos dois componentes (resina e endurecedor), até o início do endurecimento do sistema, quando este perde as condições de manuseio, dificultando sua aplicação. Deve ser regulado de acordo com as condições de obra e temperatura. A resina deve se manter na forma líquida até preencher as fissuras por completo (FIGUEREDO, 1989).

O *Pot-life* deve ser conveniente, a fim de evitar a penetração incompleta da mistura nos vazios ou obstrução de bombas, tubos ou bicos (CÁNOVAS, 1988).

Os fabricantes de produtos químicos para construção afirmam que as resinas de baixa viscosidade (abaixo de 200 cps) dispensam injeção sob pressão quando for possível verter por gravidade.

A unidade CPS significa *centipoise* (a centésima parte do *poise*) no Sistema C.G.S e é equivalente no Sistema Internacional a 1×10^{-3} kg/m.s. Uma breve explicação sobre estes sistemas de unidades consta no Anexo A deste trabalho.

Um roteiro para injeção de fissuras apresentado por Quesada (2003), é descrito a seguir:

3.3.1 Uso

A técnica de injeção é empregada no reparo de fissuras, superficiais e profundas (não passantes e passantes), tanto em áreas horizontais quanto verticais, em qualquer posição, tanto ativas quanto passivas.

3.3.2 Característica do material

- Os adesivos mais usados para este tipo de reparo são as resinas epóxi e os metacrilatos (fissuras passivas) e poliuretano (fissuras ativas);
- Devem ser de baixa viscosidade e injetáveis;
- Não são aplicáveis sob temperaturas maiores que 30° C;
- Selamento ou calafetação: além do material de injeção, emprega-se um adesivo estrutural para confinar a resina na fissura e fixar os tubos de injeção.

3.3.3 Preparo da Superfície

- A superfície deverá estar sã e limpa, e poderá ser preparada mediante hidrojateamento de alta pressão ou por jato de areia seguido de jato de ar comprimido;
- Superfície seca, ou substrato saturado e superfície seca;
- Limpeza do interior da fissura com água e ar sob pressão após a colocação do selo superficial.

3.3.4 Fixação de Bicos de Injeção e Selamento Superficial

- Colocar bicos na superfície, ao longo da fissura a cada 5 cm ($\omega \leq 1$ mm) a 30 cm ($1 \text{ mm} \leq \omega \leq 10$ mm). Se for passante, colocar em ambas as faces;
- Selar (calafetar) superficialmente todo o comprimento da fissura;
- Verificar com ar comprimido a comunicação entre os bicos.

3.3.5 Aplicação do Material de Reparo

- Injetar o material sob pressão constante no interior da fissura;
- Começar pelo bico de injeção mais baixo de cada fissura e continuar até que o material aflore no bico adjacente;
- Vedar o primeiro bico antes de iniciar a injeção no seguinte, até que o material volte a fluir no próximo ponto;
- Se a mistura for passante, verificar se o material aparece no bico oposto mais próximo. Fechar este bico e prosseguir a injeção. Se

a resina não aflorar pelo bico oposto, faz-se a injeção por ambas as faces;

- Continuar a seqüência até completar o reparo.

3.3.6 Acabamento

- Assim que o material de injeção curar, retirar o selo com disco de corte e dar acabamento com argamassa polimérica base cimento de baixa retração.

3.3.7 Equipamento e Ferramental

- Furadeira de baixa rotação com haste de mistura acoplada;
- Equipamento de injeção: bomba manual ou por ar comprimido.

A Figura 3.11 ilustra o procedimento descrito acima.

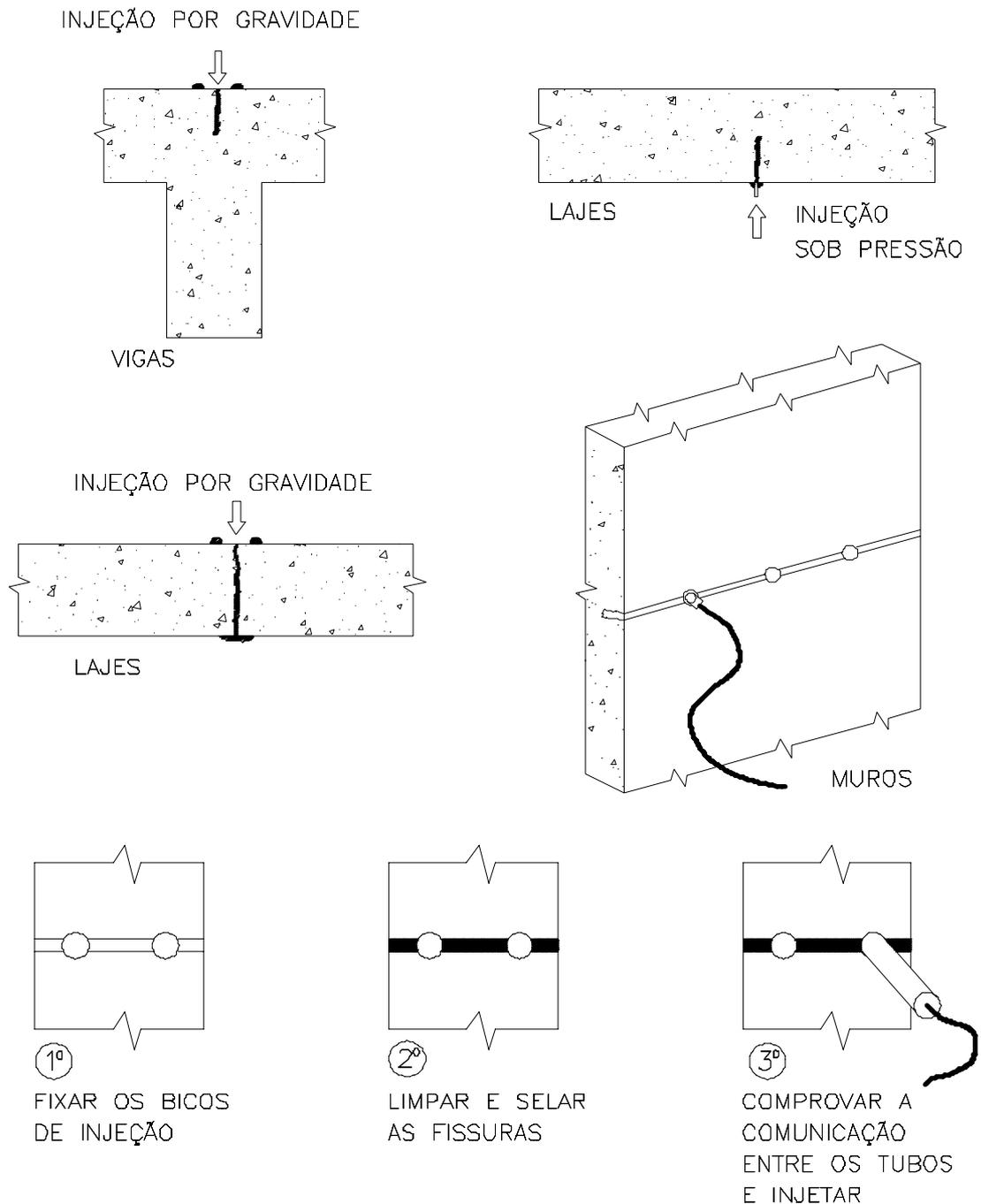


Figura 3.11 – Injeção de Fissuras. Fonte: Quesada (2003).

Amon e Snell (1979) descrevem quatro estudos de casos em que foi usado o método de ultra-som para monitorar reparos de grauteamento com epóxi comparando concretos não fissurados com concretos fissurados recém injetados com epóxi e relatam que obtiveram resultados satisfatórios.

A eficiência de serviços de reparo é freqüentemente verificada com a extração de testemunhos da estrutura reparada. Porém nem sempre é possível

extrair testemunhos, pode-se então utilizar ensaios não-destrutivos como ultrassom e eco-impacto para procurar avaliar reparos estruturais (ROCHA, 2006).

Uma das motivações deste trabalho foi verificar se o método do ultrassom é realmente capaz de avaliar reparos estruturas realizados com injeções de resina epóxi.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Considerações Iniciais

O programa experimental visa cumprir os objetivos deste trabalho, 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 Ensaio Não-Destrutivos (GPEND), com auxílio de equipamentos do Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) e do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).

Todo concreto produzido neste estudo foi confeccionado nos laboratórios supracitados, utilizando materiais doados por uma concreiteira de grande porte da região da Grande Florianópolis. Maiores detalhes sobre os materiais e a produção do concreto encontram-se nos itens 4.3 e 4.4.

Alguns estudos preliminares foram realizados para definir este programa experimental. Primeiramente, foi feita uma análise para certificar que o método do ultra-som seria capaz de detectar fendas superficiais induzidas e estimar suas profundidades (MEDEIROS, PADARATZ e PINTO 2006a). Com base neste estudo foi escolhida a geometria dos moldes utilizados na pesquisa.

A partir deste estudo preliminar foi adotado um mesmo traço de concreto para todo o programa experimental. A fim de evitar a influência de diferentes tipos de agregados e diferentes tipos de cimento nas leituras de ultra-som, todos os moldes de concreto confeccionados na pesquisa foram produzidos utilizando os mesmos materiais constituintes (agregado graúdo e miúdo, cimento, água e aditivo plastificante). Foi adotado um traço padrão do fornecedor dos materiais, com resistência característica de 30 MPa.

4.2 Definição da Morfologia dos Moldes

Foram produzidas três Séries de moldes de concreto com fendas superficiais induzidas para cumprir o programa experimental.

Foram induzidas fendas passivas de diferentes aberturas ($\omega=0,5$, 3, 6 e 25 mm) e diferentes profundidades ($h=25$, 50, 75, 100, 150 e 220 mm). As fendas foram induzidas na lateral das fôrmas de concretagem a fim de ter a face de leituras de ultra-som com superfície plana e lisa, como mostra a Figura 4.1.

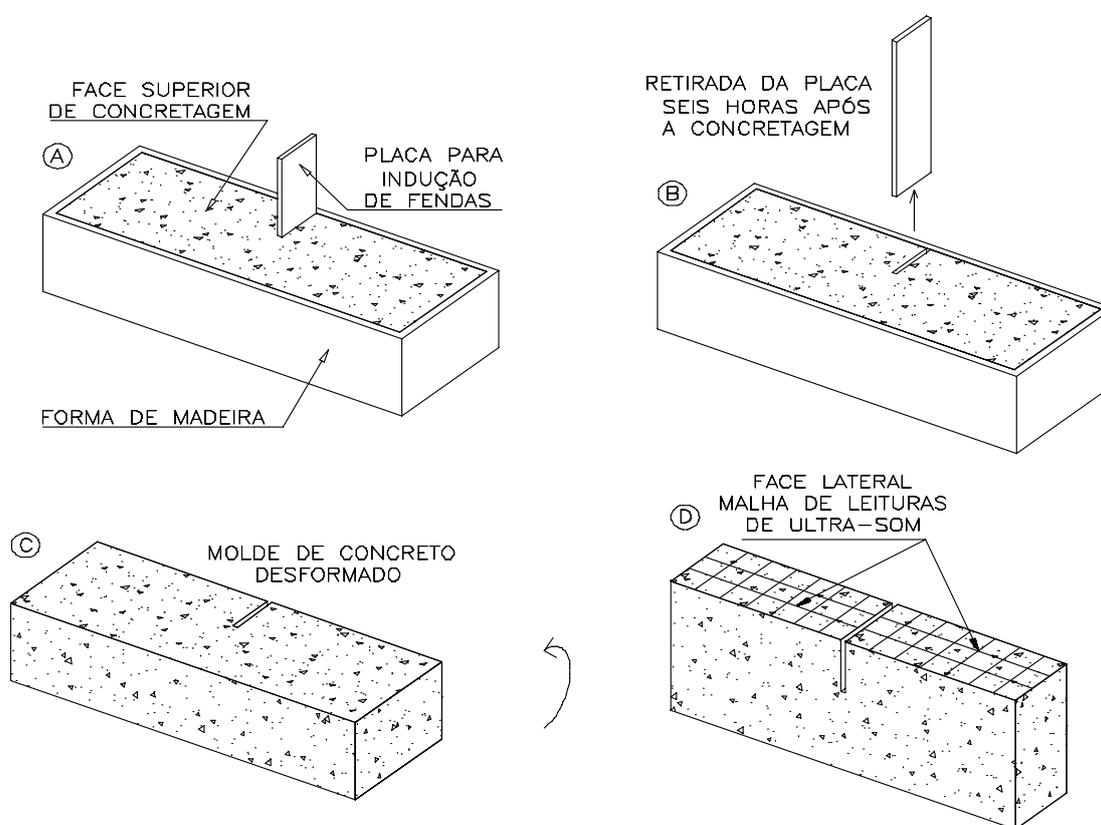


Figura 4.1 – Procedimento para a indução das fendas superficiais nos moldes de concreto.

As fendas foram induzidas deixando dentro das fôrmas placas de diferentes matérias: alumínio ($\omega=3$ mm), placas de zinco ($\omega=6$ mm), filme plástico ($\omega=0,5$ mm), papelão e madeira revestidos com papel *contact* ($\omega=6$ e 25 mm respectivamente). Um breve estudo preliminar foi realizado para determinar o tempo correto para retiradas das placas, de tal forma que fosse

possível retirar as mesmas sem que a fenda se fechasse. Este tempo foi de seis horas.

A Série 1 tem seis moldes de concreto com fendas induzidas com a mesma abertura superficial ($\omega=3$ mm) e diferentes profundidades ($h=25, 50, 75, 100, 150$ e 220 mm), visando verificar a possibilidade de diferenciar fendas de profundidades diferentes.

A Série 2 tem quatorze moldes de concreto com fendas induzidas com diferentes aberturas superficiais ($\omega=0,5, 6$ e 25 mm) e diferentes profundidades ($h=50, 75, 100$ e 150 mm) e visa estudar se existem diferenças na estimativa da profundidade das fendas para diferentes aberturas.

A Série 3 tem três moldes com fendas induzidas com a mesma abertura superficial ($\omega=6$ mm) e a mesma profundidade ($h=100$ mm), em cada um dos moldes existe uma barra de aço de diâmetro diferentes ($\varnothing=10, 12,5$ e 16 mm) embutida no concreto a 3 cm do fundo e da face lateral, atravessando a fenda conforme Figuras 4.2 e 4.3. Esta Série procurou estudar a eventual influência da presença de barra de aço paralela à direção de propagação na estimativa da profundidade das fendas.

Nestes moldes, as fendas foram induzidas deixando no fundo das fôrmas uma placa de papelão revestido com papel *contact*. Esta placa de papelão não foi retirada do concreto e a fenda induzida então passou a ser o papelão embutido no concreto. Foram realizados experimentos preliminares em laboratório para certificar que o pulso ultra-sônico desviaria do papelão, assim como desvia de uma fenda superficial preenchida com ar, confirmando que o papelão embutido no concreto pode simular uma fenda.

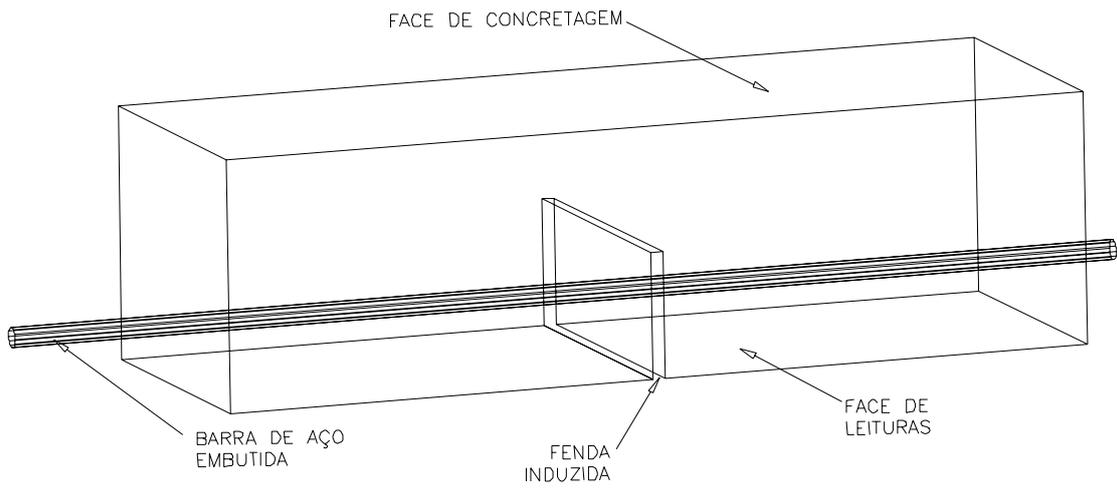


Figura 4.2 – Barra de aço embutidas no molde de concreto.

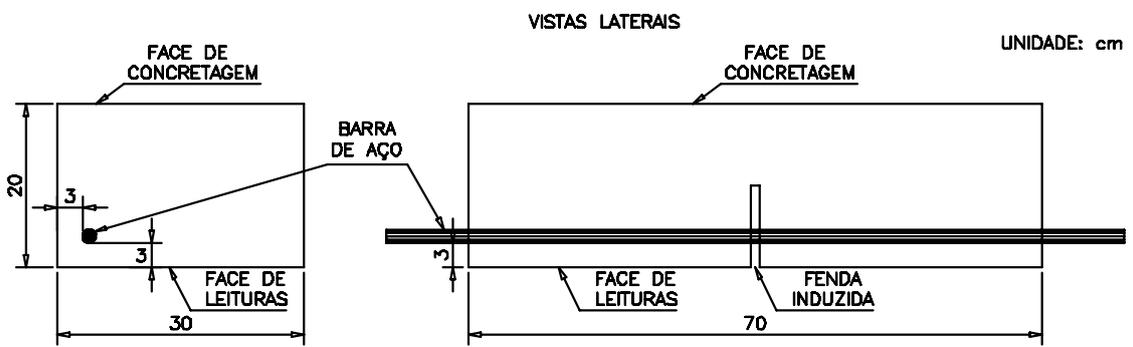


Figura 4.3 – Vistas laterais da Figura 4.2.

As características dos moldes que compõem cada uma das Séries do programa experimental estão descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Séries de moldes do programa experimental.

	Largura x Altura x Comprimento	Nº de moldes	“h” induzido ²	“ω” induzido ³	Identificação ⁴
Série 1 profundidades	15 x 15 x 50 cm	1	2,5 cm	3 mm	1a
	15 x 15 x 50 cm	1	5,0 cm	3 mm	1b
	15 x 25 x 70 cm	1	7,5 cm	3 mm	1c
	15 x 25 x 70 cm	1	10,0 cm	3 mm	1d
	15 x 30 x 70 cm	1	15,0 cm	3 mm	1e
	15 x 30 x 70 cm	1	22,0 cm	3 mm	1f
Série 2 aberturas	15 x 25 x 70 cm	4	7,5 cm	6 mm	2a1, 2a2, 2a3, 2a4
	15 x 25 x 70 cm	4	10,0 cm	6 mm	2b1, 2b2, 2b3, 2b4
	15 x 25 x 70 cm	1	5,0 cm	0,5 mm	2c
	15 x 25 x 70 cm	1	7,5 cm	0,5 mm	2d
	15 x 25 x 70 cm	1	10,0 cm	0,5 mm	2e
	15 x 25 x 70 cm	1	15,0 cm	0,5 mm	2f
	15 x 25 x 50 cm	1	5,0 cm	25 mm	2g
	15 x 25 x 50 cm	1	7,5 cm	25 mm	2h
Série 3 armaduras	25 x 20 x 70 cm	1	10,0 cm	6 mm	3a (ø=10mm)
	25 x 20 x 70 cm	1	10,0 cm	6 mm	3b (ø=12,5mm)
	25 x 20 x 70 cm	1	10,0 cm	6 mm	3c (ø=16mm)

² Por simplificação “h” indica a profundidade da fenda induzida.

³ Por simplificação “ω” indica a abertura superficial da fenda induzida.

⁴ A coluna identificação fornece uma codificação para cada molde. Nos moldes da série 3, “ø” representa o diâmetro da armadura embutida.

Para cada uma das Séries foram moldados quatro corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm, os quais foram rompidos aos 28 dias, conforme recomendação da NBR 5739 (1994), para confirmar se haviam atingido resistência mínima à compressão especificada de 30 MPa. Os resultados do rompimento destes corpos-de-prova são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resistência à compressão de cada uma das três séries (MPa).

Série 1	Série 2	Série 3
37,5	36,2	32,3
39,4	35,9	38,2
37,1	34,5	37,5
40,3	37,0	39,4

4.3 Descrição do Equipamento de Ultra-som

O equipamento de ultra-som utilizado neste trabalho foi o PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester*), modelo 6.0, fabricado pela empresa inglesa CNS Farnell. Este equipamento pertence ao Grupo de Pesquisas em Ensaios Não-Destrutivos (GPEND) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O equipamento funciona com um par de transdutores idênticos que são ligados ao mesmo através de cabos coaxiais.

Existem dois pares de transdutores que podem ser utilizados no PUNDIT aplicáveis ao programa experimental deste trabalho, diferentes apenas no tamanho e frequência natural: diâmetro 50 mm com 54 kHz e 20 mm com 200 kHz. Os transdutores de 54 kHz emitem 54 mil pulsos por segundo, assim como os transdutores de 200 kHz emitem 200 mil pulsos por segundo.

Este modelo do PUNDIT possui uma chave seletora que permite ao usuário escolher captar dez ou cem leituras por segundo, quando for utilizada aquisição de dados por computador, porém no mostrador digital é possível visualizar apenas três leituras por segundo.

A prática usual de leituras pelo mostrador digital foi observar os diferentes valores por um minuto anotando o menor valor observado, conforme recomendação da BS 1881: Part 203 (1986).

O equipamento funciona com bateria interna recarregável e alimentação externa.

Mais detalhes sobre a escolha dos transdutores e execução dos ensaios serão abordados no decorrer deste capítulo.

4.4 Variáveis Intervinentes

O programa experimental apresentado neste capítulo procurou fixar 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. Estas variáveis são apresentadas na seqüência deste capítulo.

4.4.1 Materiais Constituintes

Conforme citado anteriormente, todo o concreto produzido nas três Séries utilizou os mesmos materiais constituintes (agregado graúdo e miúdo, cimento, água e aditivo plastificante).

Tendo em vista que a dimensão máxima dos agregados e diferentes tipos de agregados podem alterar os valores de velocidade, conforme descrito no item 2.4.1, neste programa experimental foram utilizados os mesmos agregados, com a mesma composição granulométrica para todas as Séries dos moldes de concreto, descritos nos itens 4.5.2 e 4.5.3.

Levando em consideração que diferentes tipos de cimentos podem influenciar os valores de velocidade principalmente nas primeiras idades, como foi visto no item 2.4.2, foi utilizado o mesmo tipo de cimento, em todas as Séries dos moldes de concreto, descrito no item 4.5.1.

4.4.2 Frequência Natural dos Transdutores

As leituras de ultra-som foram realizadas utilizando o equipamento PUNDIT, com transdutores de 50 mm de diâmetro e frequência natural de vibração de 54 kHz. Em alguns casos excepcionais foram utilizados

transdutores de 20 mm de diâmetro e frequência natural de vibração de 200 kHz.

Conforme citado em 2.4.11, o comprimento de onda deve ser maior do que a dimensão máxima dos agregados graúdos e menor do que a dimensão lateral mínima dos moldes.

De acordo com a Equação 2.4, para transdutores de frequência natural de 54 kHz, para a faixa de velocidades obtidas neste trabalho de 3500 a 4500 m/s, o comprimento de onda varia de 65 a 83 mm, respectivamente. Enquanto que, para transdutores de frequência natural de 200 kHz, para a mesma faixa de velocidades, o comprimento de onda varia de 17,5 a 22,5 mm, respectivamente.

A fim de evitar interferências do agregado de tamanho máximo 19 mm nas leituras de ultra-som, evitou-se utilizar os transdutores de 200 kHz nas leituras para a obtenção da velocidade e estimativa da profundidade das fendas. Estes transdutores foram utilizados apenas para fins comparativos, na parte final do programa experimental, na verificação do preenchimento das fendas, e para obter o valor da velocidade de propagação de onda ultra-sônica em pequenos moldes de resinas utilizadas no preenchimento, com dimensões de 50 x 50 x 100 mm.

4.4.3 Face de Leitura do Ensaio

Os moldes foram confeccionados em fôrmas de compensado plastificado, de tal forma a ter as faces laterais e inferiores planas e lisas. Como desmoldante foi utilizado uma emulsão a base de ácidos graxos.

As leituras de ultra-som foram realizadas nas faces laterais (Série 1 e 2) ou inferiores (Série 3) dos moldes, na qual foram induzidas as fendas, a fim de ter a face adequada para as leituras de ultra-som.

4.4.4 Idades Para o Ensaio

Foram realizadas leituras aos 7, 14, 21 e 28 dias, para todos os moldes. Para os moldes da Série 1 foram realizadas leituras também aos 5, 9, 12, 16 e 19 dias, com o intuito de descobrir se nas primeiras idades, é possível estimar a profundidade de fendas, e a partir de qual idade esta estimativa tem precisão aceitável.

4.4.5 Temperatura e Umidade Relativa

Todo o concreto foi produzido em laboratório, com temperatura ambiente de $23 \pm 5^\circ \text{C}$ e umidade relativa do ar média acima de 85%.

Conforme citado no item 2.4.9, para valores de temperatura entre 5 e 30°C não existe diferença significativa nos valores de velocidade, portanto a temperatura não foi uma variável influente nos ensaios realizados neste estudo.

A umidade relativa ambiente também não exerceu influência nos resultados obtidos neste estudo, visto que apenas baixos valores de umidade relativa ambiente poderiam exercer alguma influência nos valores de velocidade, devido à maior perda de água do concreto para o ambiente.

4.5 Materiais

Os moldes de concreto confeccionados para o programa experimental foram produzidos utilizando cimento, agregados graúdos (brita 0 e brita 1), agregados miúdos (areia fina e areia média artificial), aditivo plastificante e água. As características dos mesmos serão apresentadas a seguir.

4.5.1 Cimento

Foi utilizado o cimento CPIV-RS da marca Votoran, estocado a granel. A massa específica deste cimento era de 2,83 kg/cm³. Os resultados dos ensaios físicos e químicos deste cimento, fornecidos pelo fabricante, são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Análise física e química do cimento CPIV-RS.

Ensaio Físicos					
Item de Controle	Unid.	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Material Retido #200	%	0,15	0,10	0,0	0,4
Material Retido #325	%	2,16	0,85	1,0	5,5
Blaine	cm ² /g	4797	119,7	4580	5150
Água de Consistência	%	30,66	0,19	30,3	31,0
Início de Pega	Horas	3:50	00:19	3:20	4:45
Fim de Pega	Horas	04:57	00:22	4:25	6:00
Expansibilidade a Quente	mm	0	0	0	0
Resistência R1	Mpa	-	-	-	-
Resistência R3	MPa	25,04	1,01	23,20	26,90
Resistência R7	MPa	29,57	1,11	27,70	32,10
Resistência R28	MPa	42,13	0,64	40,90	43,00
Ensaio Químicos					
Perda ao Fogo	%	3,36	0,21	2,87	3,76
SiO₂	%	29,75	0,71	28,01	31,17
AL₂O₃	%	10,54	0,40	9,62	11,30
Fe₂O₃	%	3,63	0,11	3,40	3,96
CaO	%	43,90	0,86	42,44	46,61
MgO	%	4,99	0,13	4,84	5,30
K₂O	%	1,27	0,04	1,17	1,34
Na₂O	%	0,07	0,00	0,07	0,07
SO₃	%	2,71	0,18	2,48	3,16
Resíduo Insolúvel	%	26,18	1,61	20,96	29,16
CO₂	%	2,55	0,21	2,08	3,00

4.5.2 Agregados Graúdos

Os agregados graúdos utilizados foram brita 0 (pedrisco) e brita 1, ambos de origem granítica e provenientes de São José, SC. A caracterização dos agregados graúdos foi realizada seguindo as recomendações da NBR NM 248 (2003) e está apresentada nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 – Caracterização da brita 0 (pedrisco).

Peneiras # (mm)	Massa (g)	% retida	% acumulada
75	-	-	-
63	-	-	-
50	-	-	-
37,5	-	-	-
31,7	-	-	-
19	-	-	-
12,5	-	-	-
9,5	1,32	0	0
6,3	179,21	35	35
4,8	181,54	35	70
2,4	123,54	24	94
1,2	14	3	97
0,6	2,94	1	97
0,3	2,37	0	98
0,15	2,16	0	98
Fundo	10,17	2	100
Total	516,83	100	
Módulo de finura			5,55
Diâmetro máximo			9,5 mm
Massa específica			2,625 kd/dm ³
Material pulverulento			1,3%
Massa unitária solta			1,343 kg/m ³
Massa unitária compactada			1,543 kg/m ³

Tabela 4.5 – Caracterização da brita 1.

Peneiras # (mm)	Massa (g)	% retida	% acumulada
75	-	-	-
63	-	-	-
50	-	-	-
37,5	-	-	-
31,7	-	-	-
19	20	0	0
12,5	4070	45	46
9,5	2780	31	77
6,3	1765	20	96
4,8	110	1	98
Fundo	205	2	100
Total	8950	100	
Módulo de finura			6,65
Diâmetro máximo			19 mm
Massa específica			2,645 kd/dm ³
Material pulverulento			0,70%
Massa unitária solta			1,390 kg/m ³
Massa unitária compactada			1,601 kg/m ³
% argila em torrões			2,0%

4.5.3 Agregados Miúdos

A areia fina utilizada foi proveniente da cidade de Palhoça, SC. Enquanto a areia média era industrializada (artificial), proveniente da cidade de São José, SC. A caracterização dos agregados miúdos foi realizada seguindo as recomendações da NBR NM 248 (2003) e está descrita nas Tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6 – Caracterização da areia fina.

Peneiras # (mm)	Massa (g)	% retida	% acumulada
9,5	-	-	-
6,3	-	-	-
4,8	-	-	-
2,4	0,43	0	0
1,2	0,21	0	0
0,6	0,17	0	0
0,3	2,18	0	0
0,15	539,79	77	77
Fundo	157,22	23	100
Total	700	100	
Módulo de finura		0,77	
Diâmetro máximo		0,3 mm	
Massa específica		2,630 kd/dm ³	
Argila em torrões		0,1%	
Material pulverulento		1,50%	
Matéria orgânica		Menor que a padrão	
Massa unitária compactada		1,367 kg/m ³	

Tabela 4.7 – Caracterização da areia artificial.

Peneiras # (mm)	Massa (g)	% retida	% acumulada
9,5	-	-	-
6,3	1,94	0	0
4,8	4,18	1	1
2,4	112,01	16	17
1,2	191,07	27	44
0,6	107,54	15	60
0,3	102,47	15	74
0,15	70,68	10	84
Fundo	110,11	16	100
Total	700	100	
Módulo de finura			2,79
Diâmetro máximo			4,8 mm
Massa específica			2,630 kd/dm ³
Argila em torrões			0%
Material pulverulento			8,50%
Matéria orgânica			Menor que a padrão
Massa unitária compactada			1,448 kg/m ³

4.5.4 Aditivo

O aditivo utilizado foi o WRDATM 38, redutor de água da GRACE Construction Products. A dosagem recomendada é de 0,20% a 0,40 %, com relação à massa de cimento. A massa específica do aditivo é de 1,17 kg/litro. As especificações técnicas deste aditivo constam no Anexo C deste trabalho.

4.5.5 Barras de Aço

Foram utilizadas barras de aço estrutural do tipo CA-50A nos moldes da Série 3 de diâmetro 10, 12,5, 16 mm, limpas e apropriadas para o uso em concreto armado.

4.5.6 Água

A água utilizada era potável, proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Florianópolis.

4.6 Produção do Concreto

Os moldes de concreto confeccionados nas três Séries utilizaram o mesmo traço com resistência característica de 30 MPa e abatimento de tronco de cone de 8 ± 2 cm. A Tabela 4.8 mostra a composição por metro cúbico de concreto do traço utilizado nesta pesquisa.

Tabela 4.8 – Composição por metro cúbico de concreto.

Materiais	Unidade	Quantidade
Cimento	Kg	344
Areia fina	Kg	282
Areia artificial	Kg	523
Brita 0	Kg	234
Brita 1	Kg	701
Água	Litro	195
Aditivo	Litro	1,204

A mistura do concreto foi executada mecanicamente através de uma betoneira intermitente de queda livre e eixo inclinado, com pás solidárias a cuba, e capacidade de mistura de 350 litros. Antes da concretagem a betoneira recebeu uma imprimação com argamassa.

Todos os materiais foram dosados em massa, inclusive a água. A seqüência de colocação dos materiais foi a seguinte: agregados graúdos, 80% a 90% da água, cimento, agregados miúdos, restante da água, e por fim, o aditivo.

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

Durante as primeiras 48 horas, os moldes foram mantidos nas fôrmas, cobertos com lona plástica, a fim de evitar perda de água. Após as 48 horas iniciais, os moldes foram desformados e armazenados, à sombra, em ambiente de laboratório, a uma temperatura de $23 \pm 5^\circ \text{C}$.

4.7 Descrição dos Ensaios

Foram realizados dois tipos de leituras de ultra-som, com o equipamento PUNDIT, através do modo de transmissão indireto, uma para obter a velocidade de propagação de onda ultra-sônica por este modo de transmissão e detectar a presença das fendas superficiais induzidas. Detectada a fenda, outra série de leituras era realizada para estimar a profundidade da mesma.

A calibração do PUNDIT foi feita cada vez que o equipamento foi ligado com auxílio de barra de referência, seguindo recomendação do fabricante. Foi utilizado vaselina como acoplante, tanto na calibração, como nos ensaios nos moldes de concreto.

A Figura 4.4 mostra o aparelho PUNDIT sendo calibrado e os transdutores acoplados à barra de referência.



Figura 4.4 - Aparelho PUNDIT e barra de referência para calibração.

Cada leitura de ultra-som realizada neste trabalho seguiu as recomendações da BS 1881: Part 203 (1986). Foram realizadas pelo menos

duas leituras por ponto, observando o mostrador digital por um minuto, anotando o menor valor apresentado. Como a faixa de oscilação nos tempos no mostrador digital do aparelho foi geralmente alta, de 1% a 5%, foram anotados os menores tempos dentro de faixas de oscilação semelhantes. Quando o mostrador digital mostrou valores muito dispersos, foram constatadas falhas no acoplamento. Os ensaios então foram repetidos, limpando os moldes e colocando uma nova camada de vaselina. Assim foram obtidos valores dentro dos esperados. Cada velocidade indireta ou estimativa de profundidade apresentados neste trabalho foi obtida utilizando os menores tempos de propagação obtidos.

4.7.1 Obtenção da Velocidade de Propagação de Onda Ultra-sônica e Detecção das Fendas

Para obter a velocidade de propagação de onda ultra-sônica e detectar a presença das fendas foram realizadas leituras de acordo com o procedimento recomendado pela NBR 8802 (1994) descrito no item 2.3. Foi mantido o transdutor emissor fixo e o transdutor receptor foi deslocado fazendo-se leituras sucessivas, com distância entre eixo dos transdutores conhecidas (L_1, L_2, L_3, L_4 , conforme Figura 4.5 com incremento de 5 cm ou 10 cm a cada leitura. A velocidade indireta é obtida, do gráfico Tempo de Propagação *versus* Distância, pelo coeficiente angular da reta que melhor se ajusta aos pontos (L_1T_1, \dots, L_nT_n).

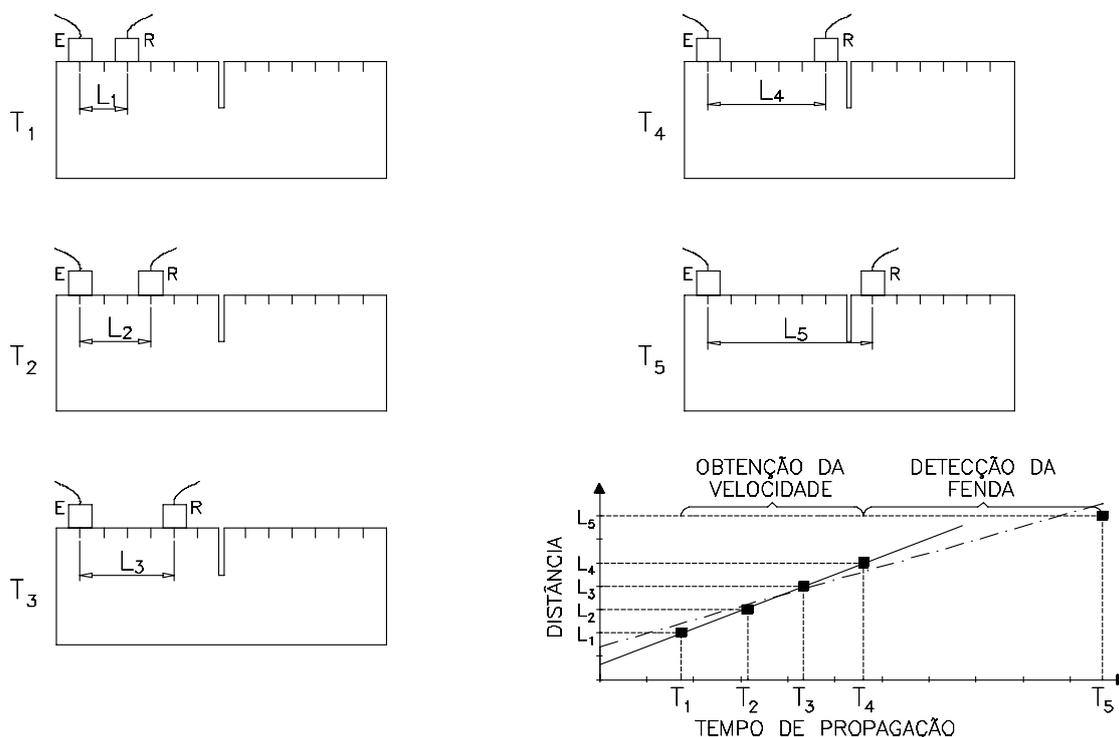


Figura 4.5 - Obtenção da velocidade indireta e detecção da fenda.

Pode-se dizer que a obtenção desta velocidade indireta é consistente quando os pontos do gráfico da Figura 4.5 (L_1T_1 a L_4T_4) estão razoavelmente alinhados. Se um dos pontos subsequentes estiver muito afastado (L_5T_5) do alinhamento dos pontos anteriores, significa que existe uma falha entre este ponto (L_5T_5) e o anterior (L_4T_4), neste caso uma fenda superficial induzida. A reta que melhor se ajuste a todos estes pontos (L_1T_1 a L_5T_5) não estará mais alinhada aos mesmos e seu coeficiente angular será menor, indicando uma menor velocidade indireta. Esta queda brusca da velocidade indica a presença da fenda. Com este procedimento pode-se confirmar a presença da fenda e localizá-la na superfície de concreto entre os pontos (L_4T_4 e L_5T_5).

Prosseguindo com leituras nos pontos seguintes (L_6T_6 a $L_{10}T_{10}$) os pontos do gráfico se agrupam de tal forma que podem ser identificadas duas linhas de inclinação semelhante. A fissura está localizada entre os pontos final da primeira reta e inicial da segunda reta, como mostra a Figura 4.6.

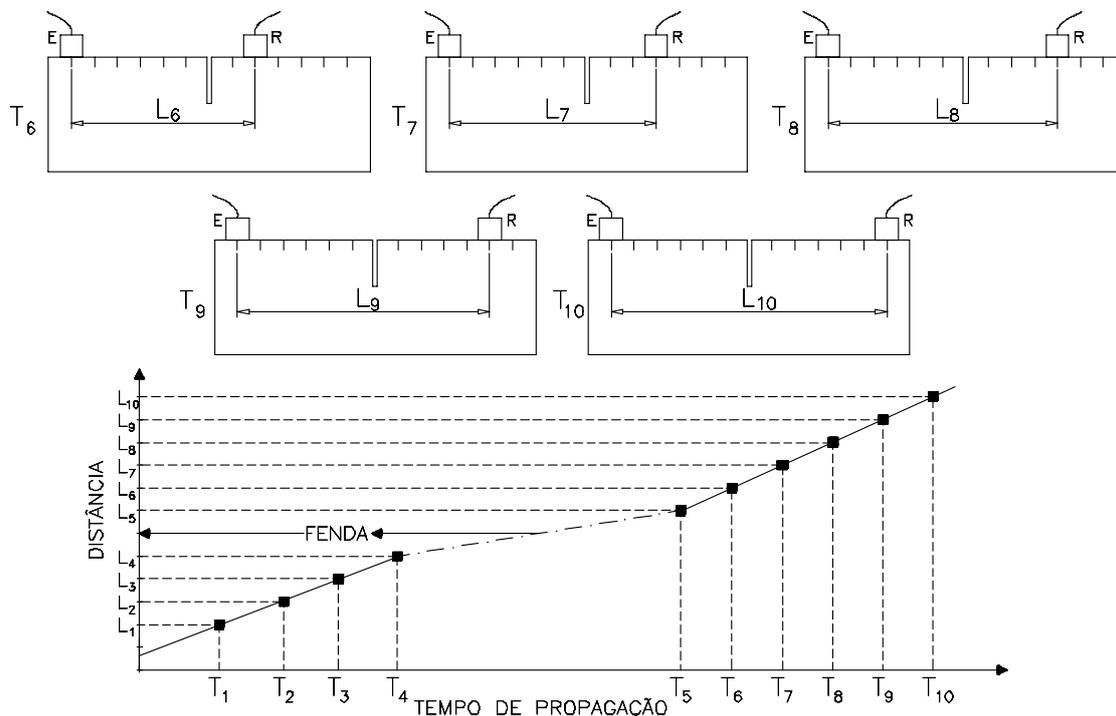


Figura 4.6 - Detecção da Fenda

Se o ultra-som for capaz de detectar a presença da fenda superficial induzida, pode-se tentar estimar a profundidade da mesma, como descrito a seguir.

4.7.2 Estimativa das Profundidades das Fendas

Para estimar a profundidade das fendas superficiais induzidas o procedimento de leituras pelo modo de transmissão indireto foi feito deixando os transdutores emissor e receptor eqüidistantes da fenda superficial, conforme a Figura 4.7.

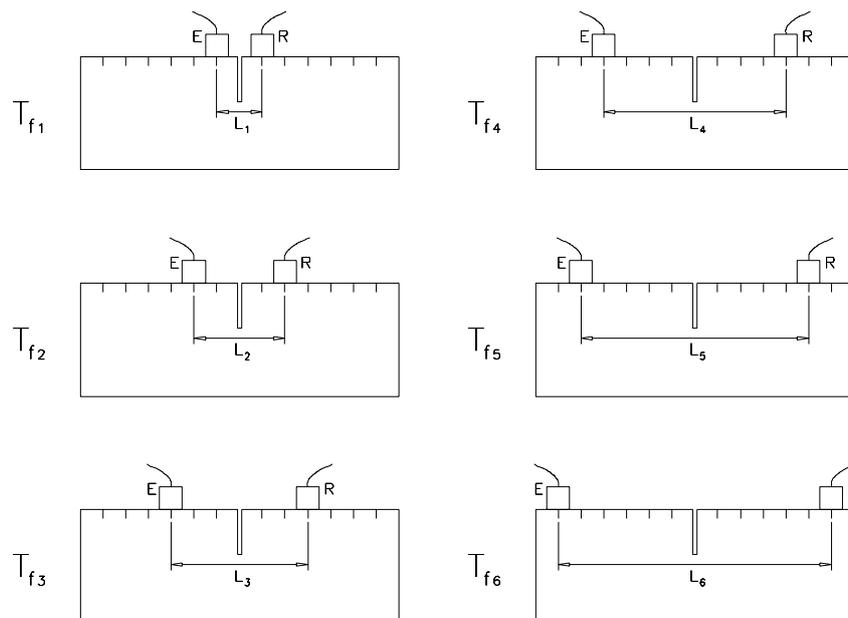


Figura 4.7 – Leituras de ultra-som eqüidistantes da fenda superficial.

Os tempos de propagação obtidos destas leituras simétricas à fenda superficial são utilizados nos dois modelos matemáticos descritos no item 2.5.2.2, baseados na Figura 2.26, utilizando a Equação 2.18 para o Modelo 1, e a Equação 2.22 para o Modelo 2.

No presente estudo foram realizadas leituras a distâncias de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 cm do eixo dos transdutores ao centro da fenda superficial induzida.

Procurou-se induzir fendas em cada um dos moldes de tal forma que o único caminho que o pulso teria para se deslocar do transdutor emissor ao receptor seria passando por baixo da fenda, nunca pela lateral, pois as fendas eram abertas também na lateral dos moldes. Nos moldes da Série 1 as fendas ficaram fechadas em uma das laterais do molde por falhas no processo de concretagem, estas falhas foram corrigidas nas Séries seguintes. A vibração no processo de concretagem na Série 1 movimentou a placa para indução de fissuras deixando uma fina camada de concreto em uma das laterais.

Para o Modelo 1, item 2.5.2.2, cada um dos tempos de propagação obtidos nas leituras eqüidistantes da fenda pode ser utilizado na Equação 2.18 como sendo o tempo de propagação “ T_f ”.

O tempo de propagação “ T_c ” para uma mesma distância entre transdutores em uma região íntegra de concreto é obtido através da Equação 2.3, sendo “ V_c ” a velocidade indireta obtida no procedimento descrito no item 4.7.1 mostrado na Figura 4.5 e sendo “ x ” a distância do centro do transdutor ao centro da fenda. Definidas as variáveis a Equação 2.3 é modificada para a Equação 4.1.

$$T_c = \frac{2x}{V_c} \quad (4.1)$$

Com estes tempos de propagação “ T_f ” e “ T_c ” e conhecida a distância dos transdutores à fenda “ x ” pode-se através dos Modelos 1 e 2 estimar a profundidade de fendas superficiais induzidas verticais.

Para o Modelo 2, item 2.5.2.2, pode-se fazer combinações de tempos para cada leitura eqüidistante da fenda superficial. De acordo com a malha de leituras realizadas na Série 1, podem-se fazer três combinações com as distâncias, em centímetros, entre o eixo dos transdutores e o centro da fenda de: 25-15, 25-5 e 15-5.

A malha de leituras de ultra-som nos moldes da Série 1 está mostrada na Figura 4.8, com unidades em centímetro. A Figura 4.9 mostra o molde 1f ($h=22$ cm; $\omega=3$ mm).

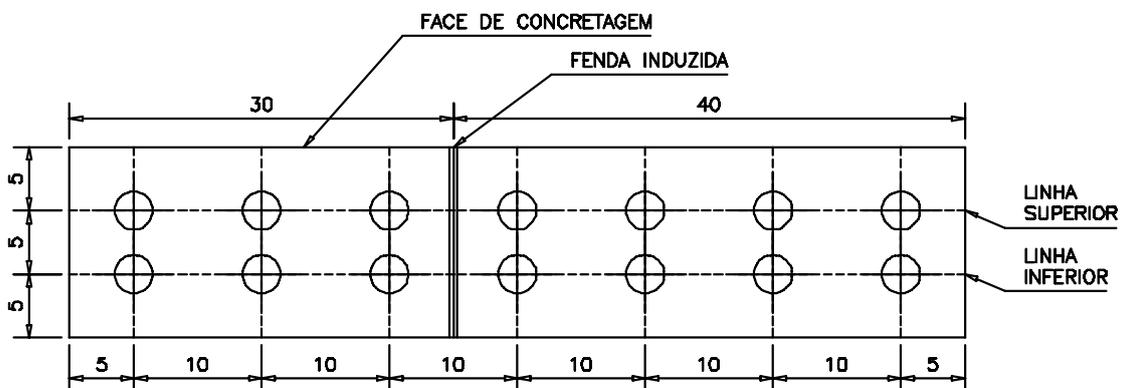


Figura 4.8 – Malha de leituras de ultra-som dos moldes da Série 1.



Figura 4.9 – Molde 1f ($h=22,0$ cm; $\omega=3$ mm).

Nos moldes 1a ($h=2,5$ cm; $\omega=3$ mm) e 1b ($h=5$ cm; $\omega=3$ mm) o comprimento dos moldes era de 50 cm, com isso a malha de leituras teve distância entre transdutores de 7,5 cm ao invés de 10 cm como mostrado na Figura 4.8, com apenas três pontos de leitura para cada lado da fenda. As leituras para a obtenção da velocidade indireta foram realizadas na outra face lateral destes moldes.

Nos demais moldes desta Série, inicialmente foram realizadas leituras, conforme procedimento descrito em 4.7.1, para a obtenção da velocidade indireta, O procedimento foi realizado tanto mantendo o transdutor emissor fixo na extremidade esquerda da malha na Figura 4.8, caminhando com o transdutor receptor no sentido da esquerda para a direita, quanto mantendo o emissor fixo na direita caminhando com o receptor no sentido da direita para a esquerda. A Figura 4.10 mostra o caminhamento do transdutor receptor nos 2 sentidos.

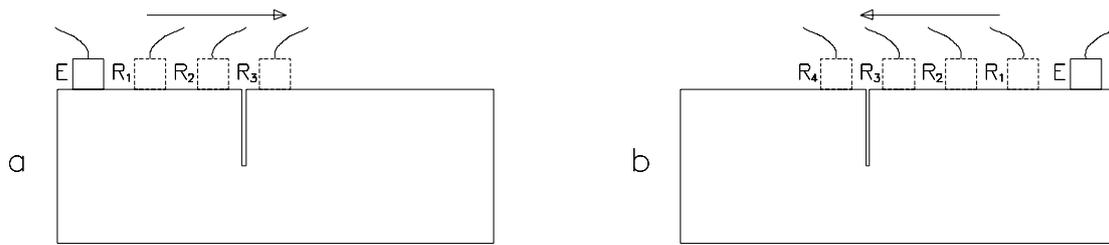


Figura 4.10 – Caminhamento do transdutor receptor nos dois sentidos.

Para a detecção da fenda o procedimento foi eficaz em ambos os sentidos. Entretanto, para a obtenção da velocidade indireta o procedimento não foi eficaz para o caminamento da esquerda para a direita (Figura 4.10a). A velocidade indireta obtida com apenas dois pontos de leitura resultou em valores muito variados e distantes dos obtidos com três ou mais pontos, para a mesma data de ensaio (mesma idade).

Para a estimativa da profundidade das fendas foram realizadas leituras conforme procedimento descrito anteriormente, na malha de leituras da Figura 4.8, para a Série 1.

Na Série 2, a malha de leituras foi aperfeiçoada, aproveitando-se experiência obtida na Série 1, como mostra a Figura 4.11, com unidades em centímetros. A Figura 4.12 mostra o molde 2b1 ($h=10$ cm; $\omega=6$ mm). A abertura mais larga na superfície é consequência de pequenas ripas de madeira necessárias para manter a placa de indução de fendas na posição desejada e evitar que a fissura ficasse aberta na lateral, como aconteceu na Série 1.

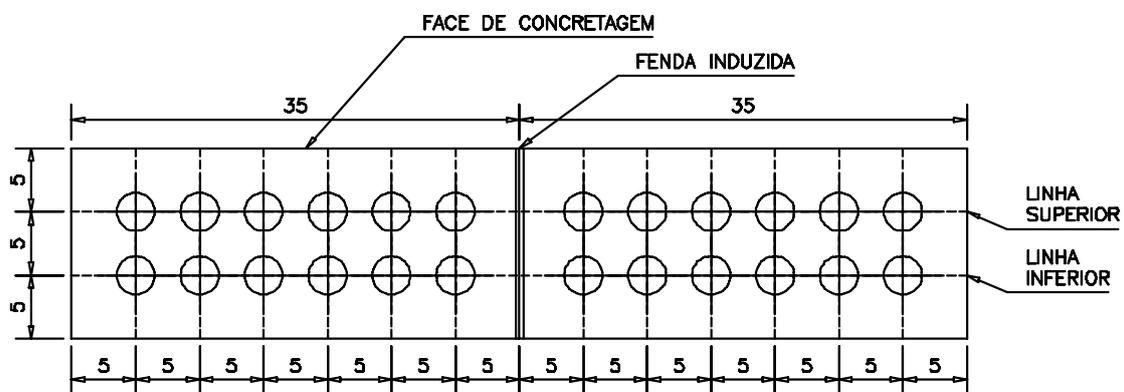


Figura 4.11 – Malha de leituras de ultra-som dos moldes da Série 2.



Figura 4.12 – Molde 2b1 ($h=10,0$ cm; $\omega=6$ mm).

Foi adotado o mesmo procedimento para obter a velocidade indireta, para a detecção das fendas e estimativa da profundidade das fendas na malha de leituras da Figura 4.11, para o Modelo 1.

O Modelo 2 utiliza leituras simétricas à fissura, proporcionais entre si. Desta forma várias combinações podem ser utilizadas na Equação 2.22. Nos moldes 2a até 2f são possíveis quinze combinações de distâncias, na malha de leituras apresentada na Figura 4.11. As distâncias entre o eixo dos transdutores e o centro da fenda, em centímetros, das combinações possíveis são: 30-25, 30-20, 30-15, 30-10, 30-5, 25-20, 25-15, 25-10, 25-5, 20-15, 20-10, 20-5, 15-10, 15-5 e 10-5.

Nos moldes 2g ($h=5$ cm; $\omega=25$ mm) e 2h ($h=7,5$ cm; $\omega=0,5$ mm) o comprimento dos moldes era de 50 cm, com isso a malha de leituras teve quatro pontos para cada lado da fenda, ao invés de seis, como mostrou a Figura 4.10, distantes entre si de 5 cm. Desta forma foram possíveis apenas as seis últimas combinações apresentadas acima.

Para cada molde foram realizadas pelo menos duas linhas de leituras sempre paralelas à superfície de concretagem, tendo assim para cada uma das

linhas de leitura uma mesma condição de adensamento. A exceção ocorreu nos moldes da Série 3.

Na Série 3 as fendas foram induzidas na face inferior de concretagem, no fundo dos moldes. Após a desforma estes moldes foram virados para que a superfície de leitura ficasse para cima. As leituras foram realizadas então na face inferior, onde o adensamento não seria uma variável para cada uma das linhas de leituras paralelas à barra de aço embutida no molde.

As leituras nestes moldes da Série 3 foram realizadas em linhas paralelas à barra de aço embutida no molde e perpendiculares à abertura superficial da fenda, a cada 2,5 cm. A malha de leituras realizadas na Série 3 está descrita na Figura 4.13, com unidades em centímetros. As Figuras 4.14 e 4.15 mostram o molde 3b ($h=10$ cm; $\omega=6$ mm; $\varnothing=12,5$ mm).

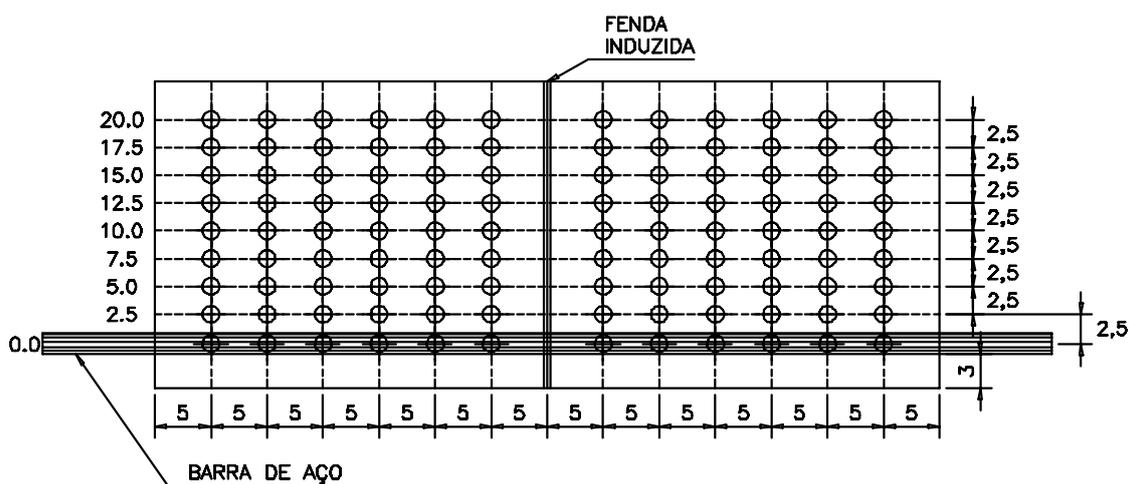


Figura 4.13 – Malha de leituras de ultra-som nos moldes da Série 3.



Figura 4.14 – Molde 3b ($h=10,0$ cm; $\omega=6$ mm; $\phi=12,5$ mm).



Figura 4.15 – Molde 3b ($h=10,0$ cm; $\omega=6$ mm; $\phi=12,5$ mm).

4.8 Preenchimento das Fendas

Em um outro estudo preliminar, onde fendas de geometria conhecidas foram preenchidas com resina epóxi fluida, foi avaliado se estes preenchimentos afetavam a estimativa da profundidade de fendas. Verificou-se que para fendas mais profundas ($h=7,5$ cm), a resina endurecia antes de alcançar o fundo das mesmas, deixando vazios irregulares no fundo e na superfície das fendas (MEDEIROS, PADARATZ e PINTO, 2006b). Foram repetidos os procedimentos para detecção e estimativa da profundidade destas fendas preenchidas, a fim de verificar se o método do ultra-som consegue indicar se as fendas foram preenchidas por completo. Foi constatado que para a fenda não preenchida por completo a fenda ainda era detectável pelo procedimento descrito em 4.7.1, enquanto que a fenda totalmente preenchida não foi detectada pelo mesmo procedimento.

A partir deste estudo preliminar, optou-se por preencher as fendas de três moldes com resina epóxi altamente fluida, que preenche a fenda por inteiro antes de endurecer, e repetir as leituras de ultra-som para avaliar a profundidade das fendas. Os moldes escolhidos para este preenchimento foram: 2a3 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm), 2b3 ($h=10$ cm; $\omega=6$ mm) e o 2f ($h=15$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Com o intuito de verificar se o ultra-som é capaz de identificar se a fenda foi preenchida apenas na superfície, foram deixados vazios internos, em duas fendas, nos moldes 2a2 e 2a4 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm), fazendo um preenchimento parcial com resina epóxi fluida, deixando vazios de 2,5 e 5 cm no fundo das fendas como mostra a Figura 4.16, com unidades em centímetros. Estes vazios foram feitos colocando peças de madeira encapadas com papel *contact* no fundo das fissuras. Foi passado óleo desmoldante nestas peças de madeira para evitar que a resina epóxi aderisse às madeiras.

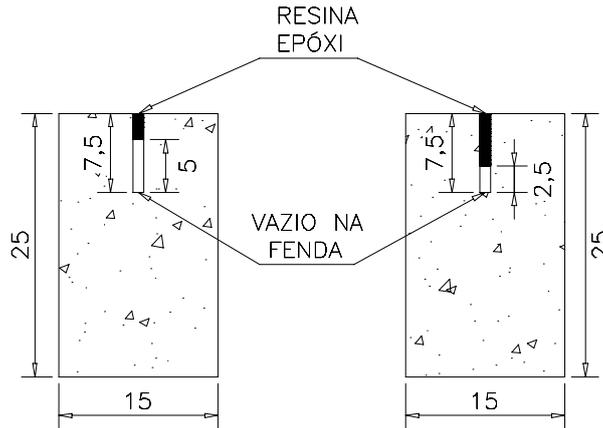


Figura 4.16 – Preenchimento parcial das fendas.

A diferença das resinas epóxi fluida e altamente fluida nos serviços de reparo é a viscosidade dinâmica. A viscosidade dinâmica especificada pelo fabricante é de 2750 cps para a resina epóxi fluida e varia de 90 a 200 cps para a resina epóxi altamente fluida, enquanto a viscosidade dinâmica da água é de 1 cps.

As diferentes resinas epóxi utilizadas para preencher as fendas foram preparadas seguindo as recomendações dos fabricantes quanto ao procedimento, cuidados e dosagem dos componentes. As especificações dos fabricantes constam no Anexo C deste trabalho.

Foram feitos pequenos moldes destas duas resinas epóxi, de 5 x 5 x 10 cm, para estimar a velocidade de propagação de onda ultra-sônica nos mesmos através do modo direto de transmissão. Estes resultados são apresentados no Capítulo 5.

As resinas epóxi foram vertidas por gravidade nas fendas. Cuidados foram tomados antes do preenchimento, selando as laterais das fendas com resina epóxi tixotrópica e após a cura desta, as fendas foram limpas com ar comprimido.

As resinas utilizadas neste trabalho foram doadas por lojas de produtos químicos para construção civil.

Foi ensaiado também o preenchimento de fendas com água para verificar se haveria mudanças na detecção das fendas e estimativas de suas

profundidades. Para manter a água dentro da fenda no molde 2h ($h=7,5$ cm; $\omega=25$ mm), as laterais da fenda foram fechadas com fita adesiva.

Procurando simular um reparo mal executado foram preenchidas fendas com uma argamassa pobre composta de areia molhada, com uma pequena quantidade de cimento, para verificar se as leituras de ultra-som indicariam se este preenchimento foi mal executado. Este procedimento foi feito no molde 2h ($h=7,5$ cm; $\omega=25$ mm).

Por fim neste mesmo molde 2h ($h=7,5$ cm; $\omega=25$ mm), depois de desfeita a argamassa pobre, foi vertida uma espuma de poliuretano expansiva que dilatou e preencheu toda a fenda.

Esta espuma de poliuretano não é utilizada para reparo estrutural de fissuras ativas em concreto, servindo apenas para estancar vazamentos de água. Em estruturas como túneis, barragens, caixas d'água entre outras, pois a mistura reage rapidamente na presença de água, dilatando e impedindo a passagem da mesma. Para o reparo da fissura, é necessário injeção sob pressão de resina de poliuretano apropriada para reparo estrutural, que após o endurecimento são flexíveis e restabelecem as condições estruturais do elemento reparado. Porém não foi viável testar este tipo de resina neste trabalho.

Houve um intervalo de dois dias entre cada um dos testes supracitados para o molde 2h, para que este pudesse ser limpo e seco à sombra.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no programa experimental, juntamente com sua análise. Cada uma das três Séries de moldes teve como objetivo principal analisar as diferenças e a sensibilidade do método do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais induzidas para diferentes profundidades (Série 1), diferentes aberturas superficiais (Série 2) e influência das barras de aço (Série 3). Posteriormente foi avaliada a capacidade do método em verificar a eficácia de serviços de reparo bem e mal executados, nas fendas superficiais induzidas.

5.1 Série 1 – Detecção das Fendas Superficiais

O procedimento descrito em 4.7.1, para detecção de fendas superficiais, se mostrou eficaz nos moldes de Série 1 apenas nas linhas superiores. Nas linhas inferiores o procedimento não se mostrou tão claro. A Figura 5.1 apresenta os gráficos para a detecção das fendas superficiais nos moldes 1d, 1e e 1f, aos 21 dias, nas linhas de leituras superiores (a esquerda da Figura 5.1) e nas linhas de leituras inferiores (a direita da Figura 5.1).

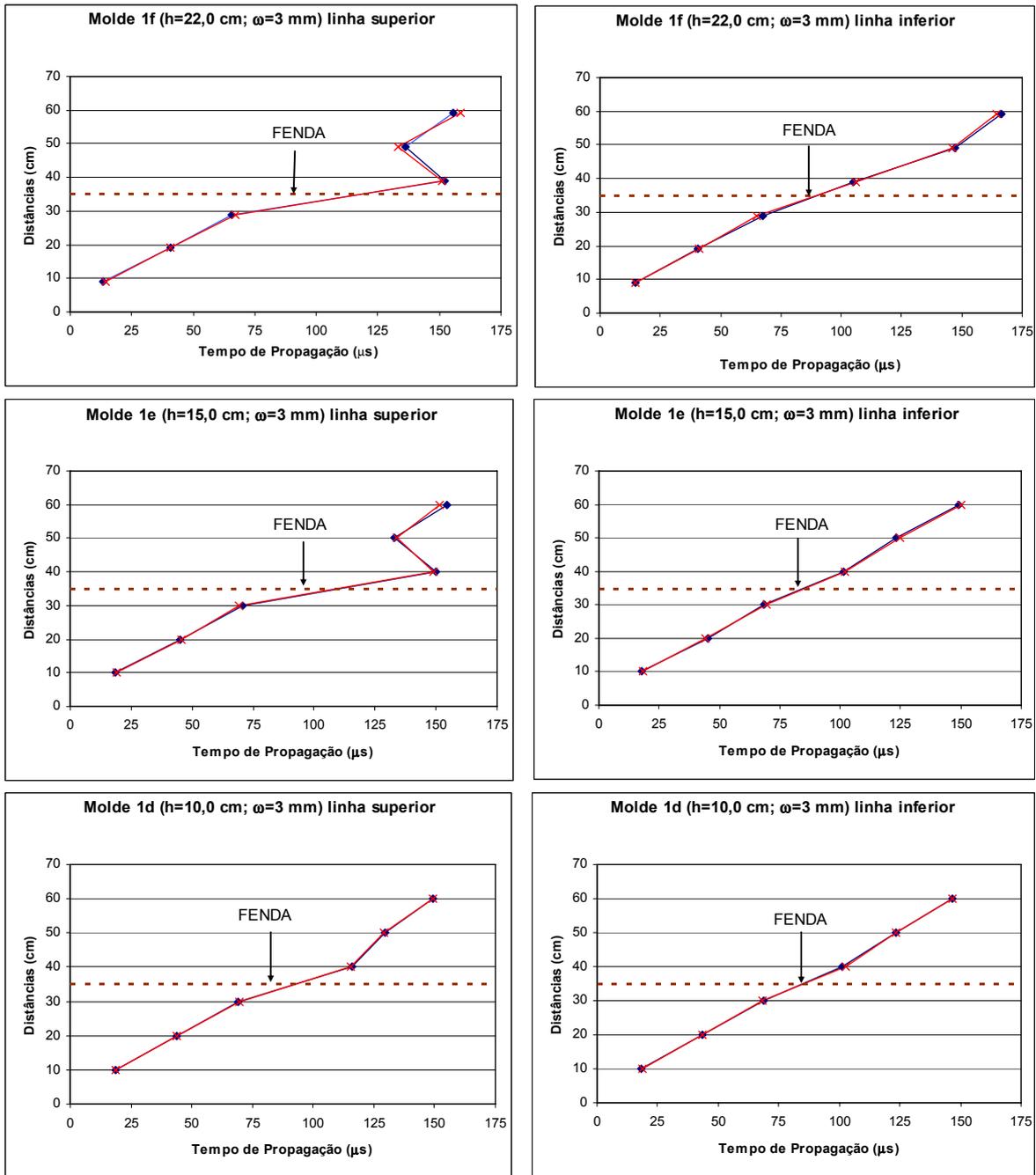


Figura 5.1- Detecção de Fendas.

A descontinuidade nos gráficos das linhas superiores entre as distâncias 30 e 40 cm indica uma falha entre estes pontos, neste caso as fendas superficiais localizadas a 35 cm do transdutor emissor. Nos gráficos das linhas inferiores esta descontinuidade é discreta ou inexistente, indicando que não existiria a fenda superficial induzida ou algo não previsto prejudicava os resultados. Pode-se observar que esta descontinuidade é maior para a fenda mais profunda ($h=22$ cm) em relação à profundidade de 15 cm, e por sua vez

esta descontinuidade na fenda de 15 cm é maior do que a descontinuidade da fenda de 10 cm de profundidade.

As fendas da Série 1 foram induzidas inserindo uma placa de alumínio em cada um dos moldes, logo após a fôrma ter sido preenchida com concreto (ainda no estado fresco), esta placa foi retirada seis horas após a concretagem. Depois de desformados, os moldes foram virados deixando a superfície de leituras de ultra-som voltada para cima, como mostrou a Figura 4.1. Porém a placa de alumínio inserida no concreto não ficou presa ao fundo da fôrma, com isso, uma fina camada de concreto ocupou o lugar da fenda no fundo da fôrma que viria a ser uma das laterais do molde. As Figuras 5.2 e 5.3 ilustram esta situação.

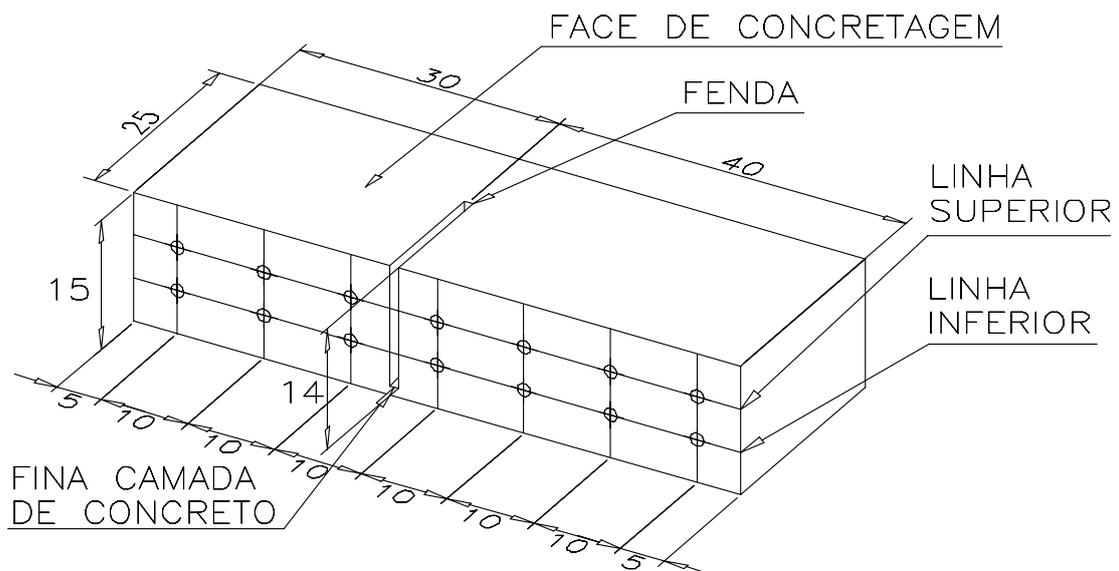


Figura 5.2 - Vista 3D do molde 1e.

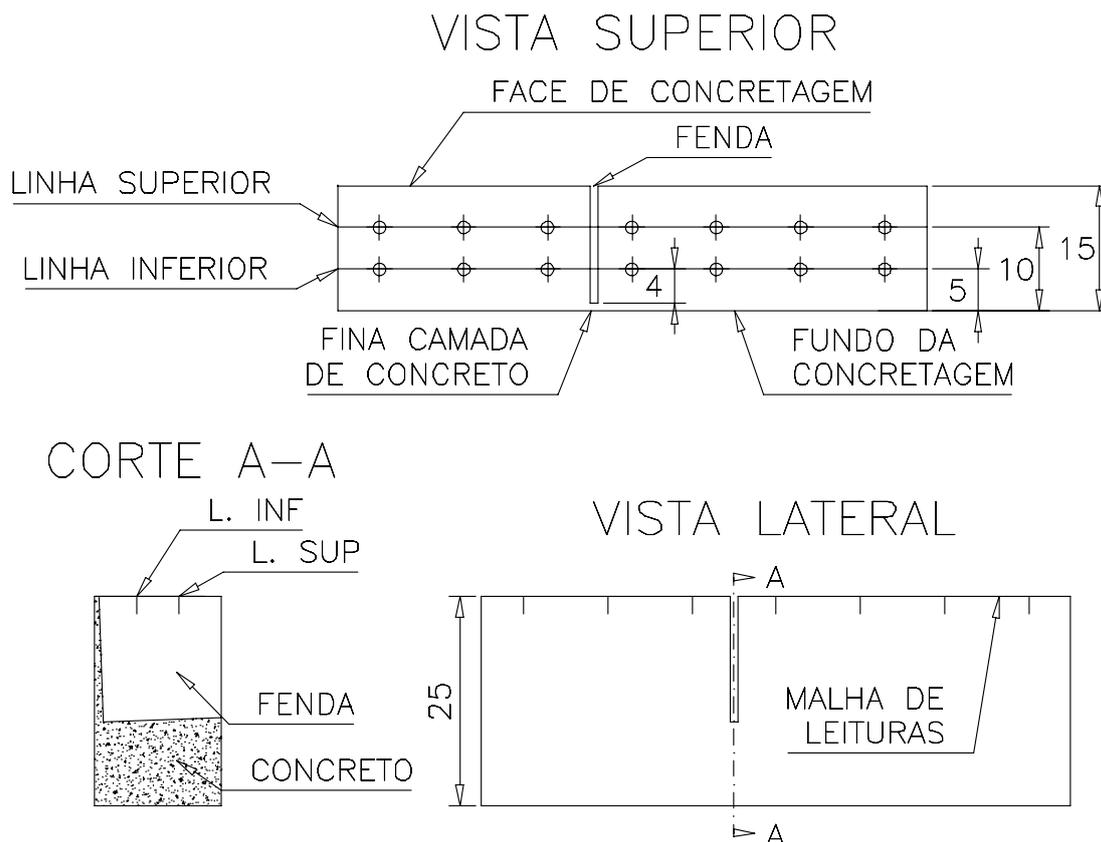


Figura 5.3 - Vistas da Figura 5.2.

Acreditava-se que esta fina camada de concreto não interferisse nos resultados, pois sua espessura (1 a 2 cm) era bem menor do que o comprimento de onda ($\lambda \approx 7,4$ cm). Porém não foi o que indicaram os gráficos para a detecção de fissuras da Figura 5.1. Nas linhas de leitura inferiores o pulso provavelmente percorria o menor caminho pela fina camada de concreto na lateral da fenda.

5.2 Série 1 – Diferentes Profundidades de Fendas

Para procurar estimar diferentes profundidades de fendas foram confeccionados para esta Série seis moldes de concreto com fendas superficiais induzidas, perpendiculares à superfície, com profundidades de 25, 50, 75, 100, 150 e 220 mm e abertura superficial de 3 mm.

O intuito desta Série foi verificar as diferenças quanto às profundidades variadas, bem como as diferenças quanto à estimativa para diferentes idades (5, 7, 9, 12, 14, 16, 19, 21 e 28 dias).

A explicação que se segue é baseada nas estimativas calculadas pelo Modelo 1, apresentado no item 2.5.2.2.

As velocidades indiretas foram obtidas conforme procedimento descrito no item 4.7.1. Esperava-se que as velocidades indiretas, em cada um dos moldes, fossem seguir uma tendência crescente com a idade. Entretanto a partir dos 7 dias, as velocidades oscilaram dentro de uma faixa de $\pm 10\%$, não seguindo uma tendência crescente. Os resultados de velocidades indiretas obtidas para cada uma das idades, em cada um dos moldes, estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados de velocidade indireta para diferentes idades, Série 1.

Linha de Leituras	Idade	Molde / Profundidade da Fissura (mm)					
		1a / 25	1b / 50	1c / 75	1d / 100	1e / 150	1f / 220
superior	5 dias	3738	3751	3726	3787	3759	3744
	7 dias	3826	3836	3870	3936	3850	3775
	9 dias	3897	3906	3857	3937	3820	4040
	12 dias			3984	4010	3865	3743
	14 dias	3890	3908	3722	3999	4119	3732
	16 dias	4156	4180	3717	4016	4097	3974
	19 dias	4107	4106	3888	3953	3812	3909
	21 dias	4092	4151	3850	3904	3785	3791
	28 dias	4183	3978	3884	3998	3876	3814
	CV ¹	4,22%	3,91%	2,41%	1,83%	3,37%	2,92%
inferior	5 dias	3796	3819	3852	3845	3767	3732
	7 dias	3950	3979	3723	3953	3859	3817
	9 dias	3980	3980	3826	3944	3784	3955
	12 dias			3979	4024	3823	4002
	14 dias	4112	3995	3832	4121	4078	4004
	16 dias	4076	4096	4007	4131	3913	3766
	19 dias	4087	4026	3883	3993	3882	3919
	21 dias	4121	4056	4011	4052	4259	3945
	28 dias	4090	3980	3925	3972	3899	4004
	CV ¹	2,78%	2,04%	2,48%	2,25%	4,01%	2,72%

¹ CV – Coeficiente de Variação é definido pela razão entre o desvio padrão e a média de uma amostra (CASTANHEIRA, 2003).

Nos valores apresentados na Tabela 5.1, estão separadas as velocidades das linhas de leituras superiores e inferiores, com os coeficientes de variação de cada molde, ao longo do tempo. Esperava-se que houvesse uma tendência de maiores velocidades para as linhas inferiores, mais compactas. Entretanto esta tendência não se confirmou, a Tabela 5.1 apresenta valores maiores hora para a linha inferior, hora para a linha superior. A justificativa encontrada foi de que os moldes com apenas 15 cm de altura não teriam diferenças significativas de adensamento devido a esta pequena espessura e as condições do concreto seriam semelhantes então nas linhas superiores e inferiores, a 5 e 10 cm da face de concretagem respectivamente. Não foram realizados ensaios nos moldes 1a ($h=2,5$ cm; $\omega=3$ mm) e 1b ($h=5$ cm; $\omega=3$ mm) aos 12 dias.

Para ilustrar como foram obtidas estas velocidades indiretas, no Anexo B deste trabalho consta uma breve explicação sobre cada leitura realizada para a obtenção das velocidades indiretas, mostrando como exemplo o molde 1f.

Pelo Modelo 1, a profundidade da fenda é calculada pela Equação 2.18, a estimativa depende da raiz quadrada da diferença dos quadrados dos tempos de propagação ao redor da fenda " T_f " e para uma mesma região sem a fenda " T_c ". Este tempo de propagação para a região sem fenda é estimado em função da velocidade indireta obtida, para cada molde e cada idade, conforme Equação 4.1.

Na seqüência são apresentadas as Tabelas 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 5.10, 5.12 com os tempos de propagação " T_f " obtidos para cada idade e distância " x " dos eixos dos transdutores ao centro da fenda para os moldes da Série 1. Estes tempos são os dados de entrada para o cálculo das profundidades das fendas.

As Tabelas 5.3, 5.5, 5.7, 5.9, 5.11 e 5.13 apresentam as profundidades calculadas para cada molde da Série 1, pelo Modelo 1, em cada idade.

Foi adotada uma precisão de 20% nas estimativas, próximo dos 15% indicado por Bunguey (1989), para conseguir diferenciar com nitidez as estimativas marcadas como aceitáveis molde a molde e compará-las. Nas Tabelas 5.3, 5.5, 5.7, 5.9, 5.11 e 5.13, onde não se apresentam valores significa que a profundidade calculada resultou em valor irreal. Quando a

velocidade é ligeiramente inferior, o tempo " T_c " supera o tempo ao redor da fenda " T_f " e retorna um valor de profundidade da fenda irreal pois a raiz quadrada da Equação 2.18 é negativa. Os valores em destaque **sublinhados**, são as estimativas calculadas com variação de $\pm 20\%$ do valor da profundidade real, enquanto os valores marcados em *itálico* são estimativas abaixo de 20% do valor real e os demais valores sem destaque são estimativas acima de 20% do valor real. Abaixo de cada uma destas Tabelas está calculado do Coeficiente de Variação (CV) e o índice de acertos (ACERTO) para cada coluna (distância " x ") ao longo do tempo dos ensaios. Sendo o índice de acertos o número de estimativas dentro da precisão adotada de 20% em cada coluna.

Tabela 5.2 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para o molde 1a ($h=2,5$ cm; $\omega=3$ mm).

Linha de leituras	Idade	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
		3,75		11,25		18,75		
Superior	7 dias	44,2	43,7	54,3	48,5	92,6	88,7	3826
	9 dias	20,9	20,4	49,0	49,1	88,5	85,6	3897
	14 dias	21,4	21,4	53,8	51,4	91,0	89,5	3890
	19 dias	20,6	20,7	54,0	53,7	89,2	89,0	4107
	21 dias	21,8	21,8	53,2	52,6	90,6	89,6	4092
	28 dias	23,7	23,0	56,8	55,5	90,6	89,3	4183
Inferior	5 dias	21,7	22,1	55,5	54,9	90,0	94,4	3738
	7 dias	21,1	21,0	52,4	53,2	89,3	90,8	3950
	9 dias	42,4	42,6	47,9	48,7	87,4	86,2	3980
	14 dias	21,8	22,3	52,4	53,9	89,4	91,2	4112
	16 dias	22,8	22,2	52,9	53,4	90,0	89,2	4156
	19 dias	20,6	20,8	53,2	53,4	89,2	89,6	4087
	21 dias	22,3	22,4	52,9	52,5	89,8	88,0	4121
	28 dias	23,8	23,3	55,4	53,6	89,4	88,3	4090

Tabela 5.3 – Profundidades calculadas “ h ” (cm), para o molde 1a ($h=2,5$ cm; $\omega=3$ mm).

Idade	Linha superior						Linha inferior					
	Distância “x” (cm)						Distância “x” (cm)					
	3,75	11,25	18,75	3,75	11,25	18,75						
5 dias	1,5	-	-	-	-	-	1,7	-	-	-	-	-
7 dias	1,8	1,8	-	-	-	-	7,6	7,5	-	-	-	-
9 dias	7,6	7,6	-	-	-	-	1,6	1,3	-	-	-	-
14 dias	<u>2,5</u>	<u>2,6</u>	-	-	-	0,2	1,8	1,8	-	-	-	-
16 dias	<u>2,9</u>	<u>2,7</u>	-	-	-	-	<u>2,7</u>	1,8	-	-	-	-
19 dias	1,9	<u>2,0</u>	-	-	-	-	<u>2,0</u>	<u>2,0</u>	-	-	-	-
21 dias	<u>2,7</u>	<u>2,7</u>	-	-	-	-	<u>2,4</u>	<u>2,4</u>	-	-	-	-
28 dias	3,1	<u>2,9</u>	1,3	-	-	-	3,2	<u>3,0</u>	3,8	<u>2,9</u>	<u>2,7</u>	-
CV	64,3%	62,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	68,8%	74,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
ACERTO	38%	63%	0%	0%	0%	0%	38%	38%	0%	13%	13%	0%

Tabela 5.4 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para o molde 1b ($h=5,0$ cm; $\omega=3$ mm).

Linha de leituras	Idade	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
		3,75		11,25		18,75		
Superior	7 dias	26,1	24,8	58,8	60,8	95,6	93,4	3836
	9 dias	21,5	22,2	59,8	59,8	92,1	90,3	3906
	14 dias	29,1	28,9	59,6	61,5	92,8	93,1	3908
	19 dias	27,2	26,8	85,2	58,0	90,6	90,9	4106
	21 dias	24,4	23,7	56,7	56,9	90,7	89,4	4151
	28 dias	28,7	28,8	60,4	61,8	95,3	95,8	3978
Inferior	5 dias	34,9	19,9	60,1	69,6	97,8	94,4	3819
	7 dias	13,1	11,9	51,6	50,9	89,4	89,7	3979
	9 dias	21,9	20,6	51,1	49,9	91,3	99,3	3980
	14 dias	18,8	19,4	54,6	56,7	90,1	88,9	3995
	16 dias	29,4	19,5	58,4	53,4	92,9	89,0	4180
	19 dias	22,5	22,4	52,1	54,9	89,1	89,0	4026
	21 dias	12,9	20,8	50,6	49,4	87,3	86,7	4056
	28 dias	23,3	23,4	63,8	57,7	91,8	90,6	3980

Tabela 5.5 – Profundidades calculadas “h” (cm), para o molde 1b ($h=5,0$ cm; $\omega=3$ mm).

Idade	Linha superior						Linha inferior					
	Distância “x” (cm)						Distância “x” (cm)					
	3,75		11,25		18,75		3,75		11,25		18,75	
5 dias	5,5	-	7,1	-	-	-	0,6	-	2,3	-	-	-
7 dias	3,3	2,9	0,8	3,1	-	-	-	-	-	-	-	-
9 dias	1,9	2,2	3,1	3,1	-	-	2,2	1,7	-	-	-	6,2
14 dias	4,3	4,2	3,0	4,2	-	-	0,2	1,0	-	1,3	-	-
16 dias	1,6	-	-	-	-	-	4,9	1,6	4,7	-	5,0	-
19 dias	4,1	4,0	13,4	3,9	-	-	2,5	2,5	-	-	-	-
21 dias	3,4	3,2	3,5	3,6	1,7	-	-	1,9	-	-	-	-
28 dias	4,3	4,3	4,2	5,0	2,8	3,4	2,7	2,8	5,9	2,3	-	-
CV	36,7%	24,6%	82,7%	18,7%	35%	0,0%	76,3%	34,1%	43,0%	38,8%	0,0%	0,0%
ACERTO	50%	38%	13%	25%	0%	0%	13%	0%	25%	0%	13%	0%

Tabela 5.6 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para o molde 1c (h=7,5 cm; ω =3 mm).

Linha de leituras	Idade	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
		5		15		25		
Superior	5 dias	88,4	88,0	84,8	84,1	129,7	129,3	3726
	7 dias	80,1	81,3	82,5	82,1	130,0	131,1	3870
	9 dias	80,8	80,8	80,6	79,5	124,6	124,2	3857
	12 dias	82,3	80,8	82,1	79,5	127,9	127,7	3984
	14 dias	81,8	81,5	82,6	82,2	130,1	128,6	3722
	16 dias	82,0	82,4	82,2	82,8	128,2	128,7	3717
	19 dias	80,7	80,2	80,1	80,2	128,1	125,6	3888
	21 dias	81,0	81,5	79,5	79,4	122,8	122,2	3850
	28 dias	86,6	86,0	80,5	80,3	127,1	123,3	3884
Inferior	5 dias	28,1	29,3	74,1	74,7	126,5	127,2	3852
	7 dias	77,7	80,3	76,8	74,5	124,1	124,8	3723
	9 dias	25,5	27,4	71,3	71,3	120,3	117,7	3826
	12 dias	25,8	25,5	70,9	71,9	122,4	122,3	3979
	14 dias	31,4	31,4	75,8	76,1	121,8	122,6	3832
	16 dias	30,3	31,0	74,2	74,6	123,9	124,5	4007
	19 dias	28,3	29,1	72,1	73,3	123,0	125,0	3883
	21 dias	73,1	28,8	71,3	70,9	119,7	119,2	4011
	28 dias	76,9	75,3	75,8	72,3	123,6	123,5	3925

Tabela 5.7 – Profundidades calculadas “h” (cm), para o molde 1c (h=7,5 cm; ω =3 mm).

Idade	Linha superior						Linha inferior					
	Distância “x” (cm)						Distância “x” (cm)					
	5,0		15,0		25,0		5,0		15,0		25,0	
5 dias	15,7	15,6	5,0	4,5	-	-	2,1	2,6	-	-	-	-
7 dias	14,7	14,9	5,5	5,2	2,8	4,3	13,6	14,1	-	-	-	-
9 dias	14,8	14,8	4,1	3,2	-	-	-	1,6	-	-	-	-
12 dias	15,6	15,3	6,5	5,1	4,9	4,7	1,2	0,9	-	-	-	-
14 dias	14,4	14,3	3,4	3,0	-	-	3,3	3,3	-	-	-	-
16 dias	14,4	14,5	2,9	3,4	-	-	3,4	3,7	-	-	-	-
19 dias	14,9	14,8	4,2	4,2	-	-	2,3	2,6	-	-	-	-
21 dias	14,8	14,9	3,0	2,9	-	-	13,8	2,9	-	-	-	-
28 dias	16,1	15,9	4,4	4,3	-	-	14,2	13,9	-	-	-	-
CV	4,0%	3,5%	27,5%	22,2%	39,0%	6,2%	88,3%	101%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
ACERTO	0%	0%	11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 5.8 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para o molde 1d (h=10,0 cm; ω =3 mm).

Linha de leituras	Idade	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
		5		15		25		
Superior	5 dias	91,4	90,9	84,9	89,6	134,2	135,4	3759
	7 dias	91,5	90,0	86,4	86,0	130,5	129,7	3850
	9 dias	88,3	87,8	84,6	85,5	124,2	125,7	3820
	12 dias	87,4	88,9	91,2	89,5	127,4	130,0	3865
	14 dias	90,1	90,5	86,4	86,7	127,4	126,4	4119
	16 dias	90,4	90,7	86,2	86,9	128,0	128,4	4097
	19 dias	91,3	89,9	85,7	86,3	126,8	126,8	3812
	21 dias	91,1	90,4	85,6	86,6	130,1	128,4	3785
	28 dias	90,2	90,7	90,8	90,1	113,8	112,3	3876
Inferior	5 dias	44,8	46,5	73,9	74,3	122,5	129,5	3767
	7 dias	82,3	79,8	78,8	76,3	125,8	125,0	3859
	9 dias	72,3	48,8	72,8	72,3	119,4	121,1	3784
	12 dias	80,0	79,7	72,8	73,4	120,7	119,5	3823
	14 dias	81,0	80,4	70,5	72,4	120,7	119,6	4078
	16 dias	81,2	81,4	75,5	76,3	121,0	121,7	3913
	19 dias	30,1	25,0	71,7	74,0	117,1	118,4	3882
	21 dias	78,7	75,4	74,1	74,0	119,4	119,9	4259
	28 dias	85,3	86,1	97,7	96,2	126,1	125,8	3899

Tabela 5.9 – Profundidades calculadas “h” (cm), para o molde 1d (h=10,0 cm; ω =3 mm).

Idade	Linha superior						Linha inferior					
	Distância “x” (cm)						Distância “x” (cm)					
	5,0		15,0		25,0		5,0		15,0		25,0	
5 dias	16,4	16,3	5,4	7,6	3,3	4,7	6,8	7,2	-	-	-	-
7 dias	16,9	16,6	7,2	7,0	2,4	-	15,1	14,6	2,5	-	-	-
9 dias	16,1	16,0	6,0	6,5	-	-	12,7	7,8	-	-	-	-
12 dias	16,1	16,4	9,2	8,6	-	2,4	14,4	14,4	-	-	-	-
14 dias	17,9	18,0	9,6	9,7	8,0	7,3	15,7	15,6	-	-	-	-
16 dias	17,8	17,9	9,3	9,6	7,9	8,2	15,1	15,1	-	-	-	-
19 dias	16,7	16,4	6,5	6,7	-	-	3,0	-	-	-	-	-
21 dias	16,5	16,4	6,1	6,6	-	-	16,0	15,3	4,9	4,8	4,6	5,2
28 dias	16,8	16,9	9,2	8,9	-	-	15,9	16,0	11,7	11,3	-	-
CV	3,9%	4,2%	22,3%	16,5%	54,5%	45,7%	36,5%	27,2%	75,4%	56,5%	0,0%	0,0%
ACERTO	0%	0%	44%	44%	0%	11%	0%	0%	11%	11%	0%	0%

Tabela 5.10 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para o molde 1e ($h=15,0$ cm; $\omega=3$ mm).

Linha de leituras	Idade	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
		5		15		25		
Superior	5 dias	116,8	109,5	120,4	122,5	133,9	140,2	3759
	7 dias	119,1	112,5	177,8	121,8	143,8	141,1	3850
	9 dias	113,2	116,0	92,1	90,1	138,2	135,0	3820
	12 dias	132,6	116,5	119,8	94,6	140,0	133,8	3865
	14 dias	115,0	115,1	96,4	96,4	137,0	137,2	4119
	16 dias	115,2	115,4	96,5	96,8	137,5	137,5	4097
	19 dias	115,2	114,9	121,9	119,7	151,4	150,2	3812
	21 dias	124,2	121,9	120,2	95,8	139,4	138,5	3785
	28 dias	98,1	98,3	89,1	89,5	135,1	135,3	3876
	Inferior	5 dias	76,6	33,6	78,8	80,0	129,9	129,8
7 dias		38,4	41,4	84,5	82,5	146,7	125,9	3859
9 dias		34,3	33,0	78,1	76,2	124,4	123,7	3784
12 dias		37,4	36,6	87,0	78,6	121,0	127,2	3823
14 dias		39,0	38,7	75,4	75,9	101,7	105,0	4078
16 dias		38,8	72,4	76,0	74,9	104,2	103,8	3913
19 dias		84,0	85,1	119,8	121,1	145,0	144,2	3882
21 dias		94,2	91,2	84,6	82,0	122,5	126,6	4259
28 dias		82,3	82,9	74,3	72,7	125,1	129,2	3899

Tabela 5.11 – Profundidades calculadas “h” (cm), para o molde 1e ($h=15,0$ cm; $\omega=3$ mm).

Idade	Linha superior						Linha inferior					
	Distância “x” (cm)						Distância “x” (cm)					
	5,0		15,0		25,0		5,0		15,0		25,0	
5 dias	21,4	20,0	16,9	17,5	2,9	8,3	13,5	3,9	-	1,4	-	-
7 dias	22,4	21,1	30,8	18,0	11,9	10,6	5,5	6,2	6,4	5,3	13,3	-
9 dias	21,0	21,6	9,2	8,4	8,5	6,3	4,1	3,7	-	-	-	-
12 dias	25,1	21,9	17,6	10,4	10,3	6,6	5,1	4,9	7,2	0,8	-	-
14 dias	23,2	23,2	13,0	13,0	13,1	13,2	6,2	6,1	3,4	3,8	-	-
16 dias	23,1	23,1	12,9	13,0	13,0	13,0	5,7	13,3	-	-	-	-
19 dias	21,4	21,3	17,7	17,2	14,4	13,9	15,5	15,7	17,8	18,1	12,9	12,6
21 dias	23,0	22,5	17,1	10,2	8,4	7,9	19,4	18,8	10,0	8,9	7,4	10,1
28 dias	18,3	18,4	8,6	8,7	7,8	7,9	15,2	15,4	-	-	-	3,0
CV	8,5%	7,2%	41,2%	29,5%	35,7%	30,6%	58,0%	60,6%	61,2%	101%	29,1%	57,7%
ACERTO	0%	0%	67%	44%	33%	33%	33%	33%	11%	0%	22%	11%

Tabela 5.12 – Tempos de propagação “ T_i ” (μ s), para o molde 1f (h=22,0 cm; ω =3 mm).

Linha de leituras	Idade	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
		5		15		25		
Superior	5 dias	88,4	90,4	140,8	147,2	179,9	202,2	3744
	7 dias	90,3	88,8	146,4	144,8	171,4	172,1	3775
	9 dias	88,9	88,3	92,5	145,2	172,0	175,2	4040
	12 dias	87,0	94,9	91,3	95,0	132,5	134,9	3743
	14 dias	88,0	88,1	90,0	89,9	159,0	148,0	3732
	16 dias	88,3	88,7	90,0	90,9	158,9	168,0	3766
	19 dias	84,0	85,6	87,0	142,7	130,1	131,9	3909
	21 dias	84,4	86,6	89,6	84,5	135,6	132,0	3791
	28 dias	82,3	84,5	82,3	84,3	170,4	170,8	3814
Inferior	5 dias	48,4	69,0	102,4	100,4	174,2	173,9	3732
	7 dias	44,8	43,5	54,6	74,6	172,7	169,8	3817
	9 dias	26,9	26,8	98,7	73,7	126,4	124,3	3955
	12 dias	38,5	40,5	78,8	72,9	127,9	128,4	4002
	14 dias	25,4	25,0	73,5	73,1	133,0	130,8	4004
	16 dias	25,5	25,2	73,8	74,2	133,8	135,7	3974
	19 dias	29,1	29,4	71,0	71,9	121,3	123,1	3919
	21 dias	45,4	45,5	72,2	72,1	125,8	125,7	3945
	28 dias	50,0	48,3	71,3	72,1	168,3	168,0	4004

Tabela 5.13 – Profundidades calculadas “h” (cm), para o molde 1f (h=22,0 cm; ω =3 mm).

Idade	Linha superior						Linha inferior					
	Distância “x” (cm)						Distância “x” (cm)					
	5,0	15,0	25,0	5,0	15,0	25,0						
5 dias	15,8	16,2	21,7	23,1	22,6	28,4	7,5	11,9	11,8	11,2	20,8	20,7
7 dias	16,3	16,0	23,2	22,8	20,5	20,7	6,9	6,6	-	-	21,5	20,6
9 dias	17,2	17,1	11,1	25,2	24,1	25,0	1,8	1,8	12,5	-	-	-
12 dias	15,5	17,0	8,2	9,5	-	3,5	5,9	6,4	4,9	-	5,5	5,9
14 dias	15,6	15,7	7,5	7,5	16,0	11,7	0,9	0,2	-	-	9,2	7,8
16 dias	15,9	15,9	7,9	8,2	16,4	19,4	0,8	0,3	-	-	9,0	10,1
19 dias	15,6	16,0	8,0	23,5	4,6	6,3	2,7	2,9	-	-	-	-
21 dias	15,2	15,6	8,0	5,6	6,0	1,0	7,4	7,5	-	-	-	-
28 dias	14,9	15,3	4,6	5,8	20,8	20,9	8,7	8,3	-	-	22,6	22,5
CV	4,3%	3,8%	60%	60%	45%	65%	66%	79%	43%	0%	52%	51%
ACERTO	0%	0%	22%	44%	44%	44%	0%	0%	0%	0%	33%	33%

Em um primeiro momento, as estimativas apresentadas não foram precisas e poucas profundidades calculadas se aproximaram do valor real. As possíveis explicações estão na indução das fendas, e na posição da malha de leituras de ultra-som.

Inicialmente acreditava-se que a fina camada de concreto na lateral não seria capaz de influenciar as estimativas das profundidades, mas não foi o que mostraram os resultados. Pois as estimativas que se aproximaram dos valores reais estiveram prioritariamente nas linhas superiores, linhas estas mais afastadas da fina camada de concreto na lateral das fendas. Nas linhas inferiores, acredita-se que a estimativa foi prejudicada pela proximidade da linha de leitura da face inferior, pois para estas linhas o menor percurso entre os dois transdutores não foi contornando a fenda por baixo, mas pela lateral. As estimativas para as linhas inferiores tiveram, em sua maioria, valores muito baixos ou irreais. Estes valores baixos ou irreais indicam, ao invés da profundidade da fenda, a distância da linha de leituras inferior até esta fina camada de concreto.

Uma alternativa para eliminar esta falha teria sido cortar os moldes com serra circular apropriada para concreto. Porém nesta etapa do programa experimental decidiu-se não cortar, pois a serra circular disponível na época era muito potente e acreditava-se que ao cortar esta lateral, poderia danificar o concreto na parte inferior das fendas prejudicando as leituras de ultra-som. Preferiu-se então fazer novos moldes de concreto (Série 2) adotando um procedimento diferente para a indução das fendas evitando que houvesse concreto entre a fissura e o fundo da fôrma.

Mesmo tendo metade dos resultados apresentados fora do esperado, ainda assim podem-se verificar algumas tendências. A análise a seguir trata apenas das linhas superiores, pois em sua grande maioria os resultados das linhas inferiores foram irreais ou pouco conclusivos.

Na Tabela 5.3, no molde 1a ($h=2,5$ cm; $\omega=3$ mm), apenas as leituras no ponto mais próximo da fenda ($x=3,75$ cm) retornaram valores reais de estimativa das fendas, apesar da variabilidade alta o índice de acertos foi de 50%. As estimativas dos pontos mais afastados ($x=11,25$ e $18,25$ cm) resultaram em sua maioria valores irreais (raiz negativa).

Na Tabela 5.5, no molde 1b ($h=5$ cm; $\omega=3$ mm), as leituras mais próximas das fendas ($x=3,75$ e $11,25$ cm) retornaram estimativas consistentes, porém ainda com parte dos resultados com raiz negativa. A variabilidade dos resultados foi alta e o índice de acertos foi pequeno. Nas leituras mais afastadas ($x=18,75$ cm) as estimativas foram imprecisas. Mesmo assim foi possível, por comparação das profundidades estimadas nos moldes 1a e 1b, diferenciar a fenda mais profunda.

Nas Tabelas 5.7, 5.9 e 5.11, nos moldes 1c ($h=7,5$ cm; $\omega=3$ mm), 1d ($h=10$ cm; $\omega=3$ mm) e 1e ($h=15$ cm; $\omega=3$ mm) respectivamente, pode-se observar que as estimativas próximas da fenda resultaram em valores maiores que os esperados: 15 ± 1 cm para o molde 1c ($h=7,5$ cm); 16 ± 1 cm para o molde 1d ($h=10$ cm); 23 ± 2 para o molde 1e ($h=15$ cm), com uma variabilidade bem menor do que os demais resultados da Série 1. Estes valores resultaram muito acima da profundidade real, indicando que para leituras muito próximas da fenda o pulso não consegue percorrer o menor caminho entre os dois transdutores. Provavelmente pelo ângulo de inclinação, dos dois triângulos da Figura 2.26 na parte inferior da fenda, ser muito fechado, o pulso precise de um percurso não retilíneo, e por conseqüência maior, para refratar e chegar até o transdutor receptor. Vale salientar que nestes pontos de leitura ($x=5$ cm) a variabilidade das leituras no ultra-som foi muito menor do que em todas as demais leituras realizadas neste programa experimental. Enquanto para as demais leituras, o normal foi a oscilação no mostrador digital do ultra-som variar de 1,0 a até 5,0 microssegundos (μs), nestes pontos próximos as fendas a oscilação não passava de 0,1 a 0,3 microssegundos (μs). A sensação durante os ensaios era como se o pulso encontra-se um único caminho pela peça, em uma comparação com ensaios de ultra-som pelo modo de transmissão direto em moldes de argamassa, onde a variabilidade é pequena.

Na Tabela 5.7, no molde 1c ($h=7,5$ cm), as estimativas para a distância intermediária “x” entre o transdutor eixo do transdutor e a fenda ($x=15$ cm), resultaram todos abaixo do valor real, com apenas um resultado dentro da precisão adotada. Para os transdutores mais afastados ($x=25$ cm) apenas quatro dos dezoito resultados retornaram valores reais, também abaixo do esperado.

Na Tabela 5.9, no molde 1d (h=10 cm), as estimativas para a distância intermediária (x=15 cm) resultaram todas abaixo do valor real, com um índice de acertos próximo de 50%. Já para os transdutores mais afastados (x=25 cm), menos da metade das estimativas resultou em valor real, porém com erros significativos de até 76%.

Na Tabela 5.11, no molde 1e (h=15 cm), as estimativas com distância entre transdutores (x=15 cm) igual à profundidade da fenda, o índice de acertos foi de 55% com uma variabilidade muito alta. Para os transdutores mais afastados (x=25 cm), um terço dos valores ficou abaixo do valor real com erros máximos de 20%, o restante destas estimativas ficou abaixo do real com erros de até 58%.

Na Tabela 5.13, no molde 1f (h=22 cm), as estimativas mais próximas da fenda (x=5 cm) resultaram em valores muito próximos de 16 ± 1 cm, com pequena variabilidade, como descrito anteriormente para as Tabelas 5.7, 5.9 e 5.11. Estes valores, menores que os reais, indicam um provável caminho preferencial pela fina camada de concreto na lateral. Na distância intermediária (x=15 cm), um terço dos resultados ficou perto do real, com erros de $\pm 15\%$ e os demais valores, menores que o real, com variabilidade alta e erros de 50 a 80%. Para os transdutores mais afastados (x=25 cm), profundidade próxima do valor de "x", o índice de acertos foi de 44% com variabilidade alta e erros significativos de 27 a 95%.

Admitindo como aceitáveis as estimativas com erros de $\pm 20\%$, o índice de acertos foi muito baixo e a variabilidade, em geral, foi muito alta. Apenas para o molde 1e (h=15 cm), para a distância intermediária (x=15 cm), o índice de acertos foi de 55%. Nos moldes 1d (h=10 cm) e 1f (h=22 cm), para os transdutores mais afastados (x=25 cm) e no molde 1a (h=2,5 cm e x=3,75 cm), o índice de acertos foi de 44%. Mesmo com a alta variabilidade, comparando os resultados dos moldes 1d (h=10 cm) e 1e (h=15 cm) pode-se verificar qual fenda seria mais profunda.

Pode-se observar, quanto a distância dos transdutores à fenda superficial induzida, quando a distância "x" foi menor que a profundidade da fenda, em geral, a estimativa resultou em valores maiores que o real. Para a

distância “x” maior que o dobro da profundidade das fendas, a estimativa retornou valores irreais ou abaixo do valor esperado.

Não estão apresentadas as estimativas calculadas pelo Modelo 2, pois estas foram pouco conclusivas para os moldes da Série 1 devido ao pequeno número de combinações.

A idade não foi uma variável conclusiva e determinante nesta Série de ensaios, visto que as poucas estimativas próximas do valor real ocorreram em todas as idades dos 5 aos 28 dias.

5.3 Série 2 – Diferentes Aberturas de Fendas

A fim de eliminar as possíveis falhas na Série 1, quanto ao erro na indução das fendas e malhas de leituras, foram moldados oito moldes de concreto, sendo quatro deles com fendas induzidas de 7,5 cm de profundidade e outros quatro com 10 cm de profundidade, todas perpendiculares à superfície. A abertura superficial das fendas nos oito moldes foi de 6 mm. Foi tomado um maior cuidado na indução das fendas para evitar que a fenda ficasse aberta na lateral, como foi descrito no item 4.7.2. e a malha foi refinada de 5 em 5 cm. O intuito destes moldes repetidos era certificar que as estimativas repetiriam a mesma tendência em cada um dos moldes de mesma geometria.

Para estes oito moldes, foi estimada a profundidade das fendas aos 7, 14, 21 e 28 dias utilizando os Modelos 1 e 2, demonstrados no Capítulo 2.

Na seqüência são apresentadas as Tabelas 5.15 e 5.18 com os tempos de propagação “ T_f ” obtidos, para cada idade e molde, a uma distância “x” dos eixos dos transdutores ao centro da fenda, para os quatro moldes de profundidade induzida de 7,5 cm e abertura de 6 mm (2a1, 2a2, 2a3 e 2a4), e para os outros quatro moldes de profundidade induzida de 10 cm e abertura de 6 mm (2b1, 2b2, 2b3 e 2b4). Estes tempos são os dados de entrada para o cálculo das profundidades das fendas.

As Tabelas 5.16 e 5.19 apresentam as profundidades calculadas para cada um destes moldes pelo Modelo 1.

Para o cálculo das profundidades pelo Modelo 2, utilizam-se como tempos de propagação “ T_1 ” e “ T_2 ” os dados das Tabelas 5.15 e 5.18 para fazer as quinze combinações de tempos possíveis para valores múltiplos de “ x ”. As combinações foram feitas com valores de “ a ” e “ b ” conforme a Tabela 5.14.

As Tabelas 5.17 e 5.20 apresentam as profundidades calculadas pelo Modelo 2.

Tabela 5.14 – Valores “ b ” e “ a ” utilizados nas combinações de tempos para o Modelo 2.

Distância do eixo dos transdutores ao centro da fenda	b	-	a
T_2 a 30 cm - T_1 a 25 cm	6	-	5
T_2 a 30 cm - T_1 a 20 cm	6	-	4
T_2 a 30 cm - T_1 a 15 cm	6	-	3
T_2 a 30 cm - T_1 a 10 cm	6	-	2
T_2 a 30 cm - T_1 a 5 cm	6	-	1
T_2 a 25 cm - T_1 a 20 cm	5	-	4
T_2 a 25 cm - T_1 a 15 cm	5	-	3
T_2 a 25 cm - T_1 a 10 cm	5	-	2
T_2 a 25 cm - T_1 a 5 cm	5	-	1
T_2 a 20 cm - T_1 a 15 cm	4	-	3
T_2 a 20 cm - T_1 a 10 cm	4	-	2
T_2 a 20 cm - T_1 a 5 cm	4	-	1
T_2 a 15 cm - T_1 a 10 cm	3	-	2
T_2 a 15 cm - T_1 a 5 cm	3	-	1
T_2 a 10 cm - T_1 a 5 cm	2	-	1

Tabela 5.15 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para os moldes 2a1, 2a2, 2a3 e 2a4 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm).

Idade	Molde	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
		5	10	15	20	25	30	
7 dias	2a1	80,7	64,3	83,1	103,1	127,9	150,3	4154
	2a2	81,9	66,2	85,8	105,4	126,0	149,4	3952
	2a3	85,8	63,1	82,2	106,1	126,0	148,1	4156
	2a4	85,7	63,4	83,2	105,5	127,2	149,1	4031
14 dias	2a1	82,3	63,3	82,7	105,2	126,1	148,4	4162
	2a2	84,0	61,7	80,1	104,9	128,2	149,7	4134
	2a3	82,3	62,1	83,3	101,8	126,6	147,5	4020
	2a4	82,8	64,2	84,7	104,6	128,0	148,4	4284
21 dias	2a1	80,2	61,4	80,2	101,0	127,0	147,0	4144
	2a2	83,9	61,4	80,7	102,6	124,4	145,9	3754
	2a3	78,5	90,5	81,0	102,5	124,7	146,3	4084
	2a4	81,6	62,8	82,4	101,7	123,7	146,4	4076
28 dias	2a1	80,9	66,1	83,1	109,2	129,6	153,2	3902
	2a2	88,0	118,2	83,9	107,5	129,3	193,9	4111
	2a3	80,3	60,0	78,6	105,6	124,2	147,8	4245
	2a4	84,5	62,6	78,6	102,2	126,7	149,3	4090

Tabela 5.16 – Profundidades calculadas “h” (cm) pelo Modelo 1, para os moldes 2a1, 2a2, 2a3 e 2a4 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm).

Idade	Molde	Distância “x” (cm)					
		5	10	15	20	25	30
7 dias	2a1	16,0	8,9	8,5	7,7	9,0	8,6
	2a2	15,4	8,4	7,9	5,8	-	-
	2a3	17,1	8,5	8,2	9,3	7,8	6,9
	2a4	16,5	8,0	7,5	7,2	5,7	1,8
14 dias	2a1	16,4	8,6	8,4	8,9	8,0	7,3
	2a2	16,6	7,9	7,0	8,4	8,8	7,6
	2a3	15,8	7,5	7,4	4,3	4,7	-
	2a4	17,0	9,4	10,2	10,1	11,3	10,5
21 dias	2a1	15,8	7,9	7,2	6,2	8,2	5,3
	2a2	14,9	5,7	2,1	-	-	-
	2a3	15,2	15,5	7,0	6,2	4,8	-
	2a4	15,9	8,0	7,6	5,4	3,2	-
28 dias	2a1	15,0	8,1	6,2	7,3	3,8	-
	2a2	17,4	22,1	8,5	9,4	9,0	26,2
	2a3	16,3	7,9	7,3	10,1	8,4	9,2
	2a4	16,5	8,0	5,8	6,1	6,8	5,7
CV		4,6%	42,1%	23,7%	24,2%	32,7%	73,6%
ACERTO		0%	75%	81%	50%	44%	25%

Tabela 5.17 – Profundidades calculadas “h” (cm) pelo Modelo 2, para os moldes 2a1, 2a2, 2a3 e 2a4 (h=7,5 cm; $\omega=6$ mm).

Idade	Molde	Combinações "b-a"														
		6-5	6-4	6-3	6-2	6-1	5-4	5-3	5-2	5-1	4-3	4-2	4-1	3-2	3-1	2-1
7 dias	2a1	9,8	6,7	8,5	8,9	18,2	4,2	8,2	8,8	19,3	10,0	9,5	23,8	9,3	57,3	-
	2a2	7,2	9,8	10,4	9,8	18,7	11,2	11,0	10,0	20,3	10,9	9,8	23,4	9,2	45,0	-
	2a3	9,8	11,3	8,7	8,8	20,4	12,2	8,4	8,7	22,2	6,1	8,0	26,1	8,9	-	-
	2a4	10,5	10,1	9,0	8,8	20,2	9,8	8,6	8,6	21,8	7,9	8,3	26,5	8,5	-	-
14 dias	2a1	9,5	10,3	8,9	8,8	19,1	10,7	8,8	8,8	20,5	7,6	8,4	23,8	8,8	143,2	-
	2a2	11,5	9,1	6,8	8,0	19,4	7,5	5,6	7,6	20,6	4,4	7,7	25,4	9,1	-	-
	2a3	12,0	7,4	9,5	8,5	19,2	3,4	9,0	8,1	20,4	11,4	8,8	26,1	7,5	90,3	-
21 dias	2a1	13,6	6,9	7,8	8,3	18,6	-	6,3	7,8	19,3	8,6	8,7	24,8	8,8	-	-
	2a2	10,4	9,4	8,5	8,5	20,2	8,9	8,1	8,3	21,8	7,7	8,2	27,1	8,5	-	-
	2a3	10,3	9,1	8,6	19,9	18,1	8,3	8,2	22,0	19,2	8,1	31,0	22,5	-	55,4	14,2
	2a4	7,8	8,1	9,4	9,0	19,2	8,3	9,7	9,1	20,9	10,5	9,2	25,5	8,6	100,6	-
28 dias	2a1	8,2	10,8	7,5	9,1	17,7	12,3	7,4	9,2	18,9	4,0	8,6	20,8	10,7	60,0	-
	2a2	-	-	-	19,3	14,2	10,2	8,1	50,7	22,2	6,9	-	27,1	-	-	8,3
	2a3	6,0	11,0	6,4	7,6	18,5	13,7	6,5	7,7	20,1	-	6,6	22,1	8,6	-	-
	2a4	9,1	6,4	5,8	8,4	19,7	4,4	5,0	8,3	21,3	5,3	9,0	28,0	10,8	-	-
CV (%)		21,3	17,8	15,6	37,5	7,7	35,1	19,3	90,3	5,2	29,3	58,2	8,1	9,8	42,2	37,6
ACERTO (%)		19	31	63	81	0	31	69	69	0	44	63	0	56	0	0

Tabela 5.18 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para os moldes 2b1, 2b2, 2b3 e 2b4 (h=10,0 cm; $\omega=6$ mm).

Idade	Molde	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
		5	10	15	20	25	30	
7 dias	2b1	99,1	74,6	89,2	114,0	138,6	159,2	3840
	2b2	94,4	75,4	89,1	112,0	135,1	157,5	3715
	2b3	94,8	70,1	90,0	113,4	133,6	159,4	4027
	2b4	96,6	75,8	91,3	112,9	131,4	156,9	4062
14 dias	2b1	101,6	73,6	92,6	116,8	137,9	160,8	3855
	2b2	96,9	71,7	92,9	111,9	137,6	158,1	3987
	2b3	97,3	89,5	89,8	117,4	139,0	159,6	3915
	2b4	94,2	94,2	96,0	115,4	134,0	156,7	3811
21 dias	2b1	93,1	71,7	88,3	111,2	130,6	151,5	4132
	2b2	94,4	72,2	88,0	109,6	131,8	151,7	3985
	2b3	91,3	71,3	87,1	111,2	131,6	155,4	3984
	2b4	92,4	71,8	90,7	112,2	131,9	156,2	3843
28 dias	2b1	90,6	120,9	93,4	119,8	138,1	160,7	4185
	2b2	95,8	135,6	110,8	111,7	130,6	157,2	3921
	2b3	94,9	139,9	92,5	115,6	138,7	159,2	4238
	2b4	95,0	127,2	92,2	118,7	139,2	157,9	4128

Tabela 5.19 – Profundidades calculadas “h” (cm) pelo Modelo 1, para os moldes 2b1, 2b2, 2b3 e 2b4 (h=10,0 cm; ω=6 mm).

Idade	Molde	Distância “x” (cm)					
		5	10	15	20	25	30
7 dias	2b1	18,4	10,3	8,3	8,9	9,1	5,9
	2b2	16,8	9,8	7,0	5,7	2,2	-
	2b3	18,4	10,0	10,2	11,0	9,9	11,4
	2b4	19,0	11,7	10,9	11,2	9,3	10,7
14 dias	2b1	18,9	10,1	9,7	10,3	9,0	7,8
	2b2	18,7	10,2	10,9	9,9	11,3	9,7
	2b3	18,4	14,4	9,2	11,3	10,7	8,7
	2b4	17,2	14,9	10,5	9,1	5,2	-
21 dias	2b1	18,6	10,9	10,4	11,3	10,2	8,9
	2b2	18,1	10,3	9,1	8,8	8,0	3,7
	2b3	17,5	10,1	8,7	9,5	7,9	7,6
	2b4	17,0	9,5	8,9	8,0	4,2	0,9
28 dias	2b1	18,3	23,2	12,5	15,1	14,5	15,2
	2b2	18,1	24,6	15,7	8,9	5,5	7,1
	2b3	19,5	27,9	12,6	14,1	15,5	15,4
	2b4	19,0	24,3	11,7	14,2	14,2	12,7
	CV	4,1%	44,9%	20,1%	23,4%	40,5%	45,1%
	ACERTO	0%	63%	75%	75%	50%	31%

Tabela 5.20 – Profundidades calculadas “h” (cm) pelo Modelo 2, para os moldes 2b1, 2b2, 2b3 e 2b4 (h=10,0 cm; ω=6 mm).

Idade	Molde	Combinações “b-a”														
		6-5	6-4	6-3	6-2	6-1	5-4	5-3	5-2	5-1	4-3	4-2	4-1	3-2	3-1	2-1
7 dias	2b1	15,4	11,2	9,2	11,2	23,0	8,4	7,6	10,7	24,5	7,2	11,2	33,7	13,8	-	-
	2b2	11,9	10,6	9,6	11,7	21,6	9,7	9,1	11,7	23,4	8,8	12,2	29,9	14,7	-	-
	2b3	4,9	10,6	9,5	9,6	21,3	13,4	10,4	10,0	24,2	8,5	9,2	29,1	9,6	-	-
	2b4	4,6	11,7	11,0	12,0	22,6	15,3	12,2	12,7	26,1	10,3	12,1	31,6	13,3	-	-
14 dias	2b1	11,8	12,6	10,5	10,6	23,6	13,1	10,2	10,4	26,2	8,4	9,9	33,8	10,7	-	-
	2b2	15,3	10,1	11,4	10,4	22,4	6,3	10,5	9,8	23,8	12,8	10,4	33,2	9,2	-	-
	2b3	15,5	13,8	9,4	16,3	22,2	12,6	7,8	16,5	23,5	4,7	17,8	28,2	136,1	-	-
	2b4	11,1	13,9	13,4	18,8	21,7	15,7	14,0	20,3	23,7	13,0	22,3	26,9	56,0	71,8	-
21 dias	2b1	13,1	13,6	11,1	11,4	22,5	13,9	10,6	11,2	24,4	8,6	10,7	29,2	11,9	-	-
	2b2	14,9	12,1	10,8	11,6	23,0	10,2	9,8	11,2	24,6	9,6	11,4	32,4	12,5	-	-
	2b3	8,5	11,2	9,2	10,6	20,9	12,7	9,3	10,9	23,1	7,3	10,5	27,4	12,4	-	-
	2b4	7,6	11,5	10,9	10,7	21,1	13,7	11,6	11,0	23,5	10,2	10,4	27,7	10,5	-	-
28 dias	2b1	12,3	15,0	10,9	30,7	19,6	16,9	10,6	40,3	20,7	6,8	-	21,8	-	56,2	8,4
	2b2	-	10,5	21,0	47,2	22,2	14,6	28,3	-	26,0	102,5	-	31,9	-	23,8	7,1
	2b3	15,5	12,6	10,9	51,1	21,4	10,6	9,8	-	22,4	9,3	-	27,4	-	-	6,2
	2b4	18,3	15,8	11,1	37,1	21,7	14,1	9,4	50,6	22,3	6,4	-	25,4	-	-	8,3
	CV (%)	33,9	13,9	25,1	72,1	4,5	22,6	42,3	74,1	6,1	160,7	31	11,3	142,8	48,4	14,1
	ACERTO (%)	25	50	88	63	0	25	69	56	0	50	50	0	31	0	13

Os dados apresentados nas Tabelas 5.16 e 5.17 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm), 5.19 e 5.20 ($h=10$ cm; $\omega=6$ mm) mostram que foi possível estimar a profundidade das diferentes fendas com precisão adotada de 20%. Apesar da variabilidade alta, o índice de acertos foi bem maior do que os resultados da Série 1. Entretanto algumas observações devem ser feitas quanto à malha de leituras adotada.

Ficou provado pelos dois modelos de cálculos adotados, que para leituras muito próximas das fendas ($x=5$ cm, e combinações 6-1, 5-1 e 4-1) em nenhum momento se conseguiu estimativas próximas das profundidades esperadas. Todos os valores ficaram muito acima do real, com índice de acertos nulo e variabilidade baixa, repetindo a tendência da Série 1. O que sugere que deve ser necessária uma distância mínima de afastamento dos transdutores ao centro da fenda, como foi observado na Série 1. Pode-se observar nos moldes com profundidade de fenda de 7,5 cm que as estimativas mais afastadas da fenda ($x=30$ cm) não apresentaram valores consistentes, a variabilidade foi muito alta e o índice de acertos foi bem menor do que para as distâncias “ x ” entre 10 e 25 cm.

Pode-se verificar que o Modelo 1 é sensível a alteração da velocidade indireta. Observando na Tabela 5.16, molde 2a2, aos 21 dias, velocidade de 3754 m/s e na Tabela 5.19, molde 2b2, aos 7 dias, velocidade de 3715 m/s os resultados ficaram quase todos muito abaixo do real. Diminuindo a velocidade indireta, o tempo “ T_c ” aumenta (Equação 4.1) e a profundidade “ h ” calculada diminui, pois a raiz quadrada da Equação 2.18 diminui.

Para o Modelo 2, as Tabelas 5.18 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm) e 5.21 ($h=10$ cm; $\omega=6$ mm) mostram que apenas as combinações de tempos chamadas de 6-3, 6-2, 5-3, 5-2, e 4-2 fornecem estimativas dentro da precisão adotada para boa parte das leituras, com índices de acertos superiores a 60%.

Nas Tabelas 5.15 a 5.20, constam apenas os valores para as linhas de leitura inferiores, visto que as leituras para as linhas superiores não se distinguiram das inferiores e oscilaram para mais ou para menos dentro da variabilidade do ensaio pelo modo de transmissão indireto. Com isso não se constatou diferenças nas estimativas para camadas diferentes, distantes apenas de 5 cm. Apresentando apenas os resultados de uma mesma linha por

molde, conseguiu-se provar que os Modelos matemáticos adotados conseguem estimar a profundidade das diferentes fendas. Tendo em vista o grande volume de resultados do ensaio, serão apresentados na seqüência apenas os resultados para as linhas de leitura inferiores nas análises dos demais moldes da Série 2.

As estimativas não tiveram influência da idade de ensaio para a maioria dos oito moldes de abertura 6 mm, visto que o índice de acertos foi alto, para distâncias “x” entre 10 e 25 cm em todas as idades. Entretanto os resultados aos 28 dias, para os moldes de profundidade de 10 cm, ficaram um pouco acima do esperado. Este fato se atribuiu a problemas na bateria do PUNDIT, que não puderam ser contornados, no final deste dia de ensaios.

Para ilustrar como foram obtidas as velocidades indiretas dos moldes da Série 2, no Anexo B encontram-se os tempos obtidos, mostrando como exemplo o molde 2a2.

Na seqüência da análise dos resultados obtidos para diferentes aberturas das fendas, as Tabelas 5.21, 5.24, 5.27 e 5.30 apresentam os tempos de propagação obtidos para cada molde e distância “x”, para os moldes 2c (h=5 cm; $\omega=0,5$ mm), 2d (h=7,5 cm; $\omega=0,5$ mm), 2e (h=10 cm; $\omega=0,5$ mm) e 2f (h=15 cm; $\omega=0,5$ mm). Estes tempos são os dados de entrada para o cálculo das profundidades das fendas. Apesar de indicar a abertura superficial destas fendas como sendo de 0,5 mm, foi verificado nos moldes 2e e 2f, cortados com serra apropriada após o término dos ensaios, que no interior do concreto a abertura variava de 0,1 a 0,6 mm.

As Tabelas 5.22, 5.25, 5.28 e 5.31 apresentam as estimativas das profundidades para o Modelo 1 para os moldes de aberturas de 0,5 mm e profundidades de 5, 7,5, 10, 15 cm, respectivamente e as Tabelas 5.23, 5.26, 5.29 e 5.32 as estimativas para o Modelo 2 para os mesmos moldes respectivos, porém apenas com as cinco combinações que se mostraram mais próximas dos valores reais nas estimativas dos oito moldes anteriores, desta Série 2.

Tabela 5.21 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para o molde 2c ($h=5,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Idade	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
	5	10	15	20	25	30	
7 dias	68,7	53,8	78,5	97,5	123,8	146,7	4180
14 dias	67,4	56,2	76,3	100,1	118,8	146,2	3797
21 dias	65,7	53,4	78,0	102,0	121,7	149,7	3861
28 dias	68,1	52,5	77,6	97,7	122,5	144,4	4107

Tabela 5.22 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1, para o molde 2c ($h=5,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Idade	Distância “x” (cm)					
	5	10	15	20	25	30
7 dias	13,5	5,1	6,6	3,9	6,7	6,3
14 dias	11,8	3,7	-	-	-	-
21 dias	11,7	2,5	1,3	-	-	-
28 dias	13,1	4,0	5,4	1,6	2,8	-
CV	7,3%	28,2%	62,6%	59,8%	58,0%	0,0%
ACERTO	0%	50%	25%	0%	0%	0%

Tabela 5.23 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2, para o 2c ($h=5,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Idade	Combinações “b-a”				
	6-3	6-2	5-3	5-2	4-2
7 dias	6,8	4,9	6,6	4,7	5,6
14 dias	5,3	6,2	7,5	7,2	6,2
21 dias	5,2	4,1	7,3	5,0	3,6
28 dias	7,0	4,7	6,6	4,3	4,7
CV	16,2%	18,2%	6,7%	24,4%	22,1%
ACERTO	50%	75%	0%	75%	50%

Tabela 5.24 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para o molde 2d ($h=7,5$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Idade	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
	5	10	15	20	25	30	
7 dias	77,1	63,9	82,8	105,4	127,3	148,6	3942
14 dias	76	63,8	84,4	107,1	124,9	153,2	3963
21 dias	74,7	63,2	81,7	104,4	125,7	148,1	4183
28 dias	82,2	62,4	79,7	104,8	125,8	148,8	4244

Tabela 5.25 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1, para o molde 2d ($h=7,5$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Idade	Distância “x” (cm)					
	5	10	15	20	25	30
7 dias	14,4	7,7	6,4	5,6	2,1	-
14 dias	14,2	7,7	7,4	7,1	-	4,6
21 dias	14,8	8,6	8,2	8,8	8,1	7,7
28 dias	16,7	8,7	7,8	9,7	9,4	9,8
CV	7,7%	6,8%	10,1%	23,3%	59,1%	35,4%
ACERTO	0%	100%	100%	50%	25%	25%

Tabela 5.26 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2, para o molde 2d ($h=7,5$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Idade	Combinações “b-a”				
	6-3	6-2	5-3	5-2	4-2
7 dias	8,9	9,0	8,3	8,8	8,6
14 dias	8,3	8,2	10,5	9,2	8,1
21 dias	8,4	8,8	8,2	8,8	8,6
28 dias	6,8	8,4	6,6	8,4	8,0
CV	11,0%	4,3%	19,4%	3,7%	3,8%
ACERTO	100%	75%	75%	75%	100%

Tabela 5.27 – Tempos de propagação “ T_f ” (μs), para o molde 2e ($h=10,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Idade	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
	5	10	15	20	25	30	
7 dias	91,5	83,7	91,8	111,9	135,2	153,4	3850
14 dias	90,9	79,8	91,1	110,5	130,2	152,5	4249
21 dias	91,3	80,3	93,8	109,6	137,0	153,9	3893
28 dias	92,1	80,3	90,2	108,3	132,8	152,1	3918

Tabela 5.28 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1, para o molde 2e ($h=10,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Idade	Distância “x” (cm)					
	5	10	15	20	25	30
7 dias	16,9	12,6	9,3	8,0	7,2	-
14 dias	18,7	13,7	12,2	12,3	11,8	12,2
21 dias	17,1	12,0	10,4	7,4	9,3	-
28 dias	17,3	12,1	9,3	7,1	7,2	-
CV	4,6%	6,0%	13,2%	27,9%	24,7%	0,0%
ACERTO	0%	0%	75%	25%	50%	0%

Tabela 5.29 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2, para o molde 2e ($h=10,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Idade	Combinações “b-a”				
	6-3	6-2	5-3	5-2	4-2
7 dias	12,3	15,5	10,8	15,0	16,8
14 dias	12,2	14,2	12,6	14,7	15,1
21 dias	13,2	14,1	11,3	13,2	15,7
28 dias	11,9	14,5	10,8	14,2	16,3
CV	4,5%	4,3%	7,3%	5,5%	4,6%
ACERTO	25%	0%	75%	0%	0%

Tabela 5.30 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para o molde 2f ($h=15,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Idade	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
	5	10	15	20	25	30	
7 dias	116,0	139,1	125,8	128,2	146,8	161,4	3857
14 dias	111,3	138,8	114,7	126,5	142,8	162,7	3980
21 dias	71,0	139,4	114,2	128,2	145,7	159,5	4090
28 dias	70,0	81,3	114,1	121,5	139,7	160,2	3967

Tabela 5.31 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 1, para o molde 2f ($h=15,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Idade	Distância “x” (cm)					
	5	10	15	20	25	30
7 dias	21,8	24,9	19,1	14,5	13,3	8,3
14 dias	21,6	25,7	17,2	15,3	13,5	12,2
21 dias	13,6	26,7	17,9	17,0	16,2	12,8
28 dias	13,0	12,7	16,9	13,4	12,0	10,5
CV	27,8%	29,4%	5,3%	9,8%	13,0%	18,4%
ACERTO	50%	25%	75%	100%	75%	50%

Tabela 5.32 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelo Modelo 2, para o molde 2f ($h=15,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).

Idade	Combinações “b-a”				
	6-3	6-2	5-3	5-2	4-2
7 dias	28,6	47,0	29,7	67,2	-
14 dias	21,0	45,2	22,4	94,2	-
21 dias	22,0	49,9	20,3	74,7	-
28 dias	21,7	13,3	24,0	13,0	12,0
CV	15,2%	44,1%	16,7%	55,8%	0,0%
ACERTO	0%	25%	0%	25%	0%

Com base nos resultados das Tabelas 5.22 ($h=5$ cm; $\omega=0,5$ mm), 5.25 ($h=7,5$ cm; $\omega=0,5$ mm), 5.28 ($h=10$ cm; $\omega=0,5$ mm) e 5.31 ($h=15$ cm; $\omega=0,5$ mm), pode-se afirmar que com o Modelo 1 foi possível estimar com a precisão adotada as profundidades das diferentes fendas, mesmo para uma abertura superficial menor do que 1 mm. A partir da análise das referidas Tabelas pode-se confirmar algumas tendências afirmadas anteriormente.

Para valores próximos das fendas ($x=5$ cm), todas as estimativas se mostraram mais uma vez muito acima do valor real e o índice de acertos foi praticamente nulo, porém nestes quatro moldes pode-se notar que as estimativas só passaram a se aproximar da precisão adotada de 20% a partir dos pontos de leitura com distância maior do que a profundidade da fenda. No caso da profundidade real de 7,5 cm, as estimativas foram boas a partir do ponto 10 cm em diante; para a profundidade real de 10 cm, as estimativas melhoraram a partir do ponto 15 cm em diante e para a profundidade real de 15 cm, somente a partir do ponto 20 cm em diante. O que sugere que o Modelo 1 funcione bem para distâncias ligeiramente maiores do que a profundidade das fendas em todos os moldes estudados. Apesar dos resultados variados, o índice de acertos foi alto, a exceção foi o molde 2c ($h=5$ cm; $\omega=0,5$ mm), Tabela 5.22, onde as estimativas ficaram abaixo do esperado aos 14 e 21 dias, conseqüência da sensibilidade do Modelo 1 a velocidades menores. Pode-se verificar que o índice de acertos diminui à medida que se aumenta a distância “x” nestes quatro moldes 2c, 2d, 2e e 2f ($h=5, 7,5, 10$ e 15 cm respectivamente).

Quanto ao Modelo 2, os resultados foram menos satisfatórios em comparação ao Modelo 1. Foi possível, por comparação dos dados das Tabelas 5.23 ($h=5$ cm; $\omega=0,5$ mm), 5.26 ($h=7,5$ cm; $\omega=0,5$ mm), 5.29 ($h=10$ cm; $\omega=0,5$ mm) e 5.32 ($h=15$ cm; $\omega=0,5$ mm), apontar que as fendas eram de profundidades diferentes, conseguindo distinguir as mais profundas das mais rasas. Entretanto as estimativas estiveram em média acima dos valores esperados, principalmente para as fendas de maior profundidade.

Na seqüência da análise dos resultados, para diferentes aberturas e fendas, as Tabelas 5.33 e 5.35 apresentam os tempos de propagação obtidos para cada molde e distância “x” para os moldes 2g ($h=5$ cm; $\omega=25$ mm) e 2h

($h=7,5$ cm; $\omega=25$ mm), respectivamente. Estes tempos são os dados de entrada para o cálculo das profundidades.

As Tabelas 5.34 ($h=5$ cm; $\omega=25$ mm) e 5.36 ($h=7,5$ cm; $\omega=25$ mm) apresentam as estimativas das profundidades para os Modelos 1 e 2, sendo que por estes moldes serem menores havia apenas a possibilidade de seis combinações. Foram apresentadas apenas as combinações 4-3, 4-2 e 3-2, não apresentando as combinações que abrangiam os pontos mais próximos das fendas.

Tabela 5.33 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para o molde 2g ($h=5,0$ cm; $\omega=25$ mm).

Idade	Distância “x” (cm)				Vel. (m/s)
	5	10	15	20	
7 dias	66,4	53,9	76,9	101,7	4065
14 dias	69,6	56,1	75,9	99,6	4098
21 dias	63,1	56,5	77,0	98,5	3906
28 dias	64,2	57,5	78,4	98,4	3876

Tabela 5.34 – Profundidades calculadas “h” (cm) pelos Modelos 1 e 2, para o molde 2g ($h=5,0$ cm; $\omega=25$ mm).

Idade	Distância “x” (cm)				Combinações “b-a”		
	5	10	15	20	4-3	4-2	3-2
7 dias	12,5	<u>4,5</u>	<u>4,4</u>	<u>5,2</u>	2,9	<u>4,1</u>	<u>4,6</u>
14 dias	13,4	<u>5,7</u>	<u>4,1</u>	<u>4,1</u>	<u>4,2</u>	6,3	7,1
21 dias	11,3	<u>4,7</u>	1,1	-	7,1	6,9	6,8
28 dias	11,4	<u>4,9</u>	2,4	-	8,9	7,5	6,7
CV	8,2%	10,6%	51,8%	17,7%	47,0%	23,3%	18,6%
ACERTO	0%	100%	50%	50%	25%	25%	25%

Tabela 5.35 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para o molde 2h ($h=7,5$ cm; $\omega=25$ mm).

Idade	Distância “x” (cm)				Vel. (m/s)
	5	10	15	20	
7 dias	87,8	58,8	78,5	107,0	4167
14 dias	89,8	59,4	79,3	104,4	4032
21 dias	88,5	62,4	78,6	101,0	3937
28 dias	87,5	60,4	81,5	101,5	4167

Tabela 5.36 – Profundidades calculadas “ h ” (cm) pelos Modelos 1 e 2, para o molde 2h ($h=7,5$ cm; $\omega=25$ mm).

Idade	Distância “x” (cm)				Combinações “b-a”		
	5	10	15	20	4-3	4-2	3-2
7 dias	17,6	7,1	6,5	9,8	-	5,5	7,7
14 dias	17,4	6,6	5,5	6,6	3,7	6,6	7,7
21 dias	16,7	7,1	3,8	-	6,6	9,2	10,6
28 dias	17,5	7,6	8,0	6,9	9,6	8,0	7,2
CV	2,4%	6,0%	29,4%	23,4%	44,6%	22,5%	18,6%
ACERTO	0%	100%	50%	50%	25%	50%	75%

Com base nos resultados das Tabelas 5.34 ($h=5$ cm; $\omega=25$ mm) e 5.36 ($h=7,5$ cm; $\omega=25$ mm), pode-se afirmar que o Modelo 1 consegue estimar com precisão razoável as profundidades das duas diferentes fendas. Apesar da variabilidade dos resultados, o índice de acertos foi maior em comparação às mesmas profundidades na Série 1. Comparando as Tabelas 5.34 e 5.36 pelo Modelo 1, pode-se apontar qual delas indica a fenda mais profunda, no caso a Tabela 5.36 ($h=7,5$ cm). Seguindo a mesma tendência dos moldes anteriores, as profundidades calculadas para as distâncias ($x=5$ cm) mais próximas das fendas ficaram muito acima dos valores reais.

Porém, as estimativas com o Modelo 2 se mostraram menos consistentes, sendo mais difícil de distinguir as duas profundidades ($h=5$ e $7,5$ cm), provavelmente pelas pequenas distâncias das combinações, visto que estes moldes eram menores.

Nesta Série 2, pode-se observar que a abertura das fendas não exerceu influência nos resultados. Foi possível estimar as profundidades das diferentes fendas e identificar por comparação dos resultados quais fendas eram mais profundas em todas as aberturas ($\omega=0,5$ mm; $\omega=6$ mm; $\omega=25$ mm).

5.4 Série 3 – Influência das Barras de Aço

Concluída a etapa de análise dos resultados das diferentes aberturas e diferentes profundidades de fendas, foi escolhida uma abertura ($\omega=6$ mm) e uma profundidade ($h=10$ cm) e procurou-se estimar a profundidade das fendas com leituras paralelas às barras de aço embutidas no concreto.

As Tabelas 5.37, 5.40 e 5.43 apresentam os tempos de propagação obtidos (dados de entrada), para cada molde e distância “x”, para os moldes 3a, 3b, 3c ($h=10$ cm; $\omega=6$ mm), com barras de aço embutidas com diâmetro de 10, 12,5 e 16 mm respectivamente.

As Tabelas 5.38, 5.41 e 5.44 apresentam as estimativas das profundidades para o Modelo 1 para os moldes 3a, 3b, 3c, respectivamente, e as Tabelas 5.39, 5.42 e 5.45 as estimativas para o Modelo 2 para os mesmos moldes respectivos, com as quinze combinações possíveis.

Tabela 5.37 – Tempos de propagação “ T_f ” (μ s), para o molde 3a
($h= 10,0$ cm; $\omega=6$ mm; $\phi=10$ mm).

Idade	y (cm)	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
		5	10	15	20	25	30	
14 dias	0	26,8	45,8	88,1	108,3	131,1	152,2	4194
	2,5	31,0	51,7	90,2	110,6	133,5	150,7	4249
	5	86,6	88,9	91,3	110,6	133,7	150,9	4071
	7,5	94,6	88,3	92,4	108,5	132,4	153,1	4077
	10	86,6	70,7	90,4	110,6	133,8	152,1	4235
	12,5	85,8	73,8	89,8	112,8	131,4	154,7	4596
	15	88,5	71,7	88,8	110,0	134,7	151,1	4485
	17,5	88,7	71,7	92,1	111,7	137,9	154,8	4188
	20	95,8	89,8	93,6	112,9	138,5	154,9	4212
28 dias	0	26,2	48,1	86,5	110,9	160,8	152,2	4250
	2,5	31,8	48,3	71,8	106,1	130,5	148,4	4236
	5	56,3	52,4	90,9	109,3	126,4	149,1	3840
	7,5	79,6	81,0	87,4	104,9	125,8	150,8	4391
	10	80,0	107,0	86,1	107,4	128,0	150,0	3809
	12,5	78,1	107,4	86,1	107,2	126,9	154,7	4525
	15	79,7	121,5	91,4	108,7	130,8	148,7	3895
	17,5	80,6	101,9	90,2	102,6	129,8	149,5	3852
	20	81,8	100,8	93,4	110,9	126,7	147,4	3800

Tabela 5.38 – Profundidades calculadas “h” (cm) pelo Modelo 1,
para o molde 3a ($h= 10,0$ cm; $\omega=6$ mm; $\phi=10$ mm).

Idade	y (cm)	Distância “x” (cm)					
		5	10	15	20	25	30
14 dias	0	2,6	-	10,8	10,8	11,4	10,9
	2,5	4,3	4,5	11,9	12,3	13,4	11,2
	5	16,9	15,1	11,0	10,3	10,8	6,6
	7,5	18,6	15,0	11,4	9,4	10,2	8,6
	10	17,6	11,1	11,9	12,2	13,3	11,7
	12,5	19,1	13,7	14,2	16,5	16,9	19,1
	15	19,2	12,6	13,1	14,4	17,0	15,8
	17,5	17,9	11,2	12,1	12,1	14,5	12,3
	20	19,5	16,1	12,8	12,9	15,0	12,8
28 dias	0	2,4	2,1	10,6	12,5	23,3	12,1
	2,5	4,5	2,2	2,5	10,2	11,8	9,4
	5	9,6	1,1	8,9	6,4	-	-
	7,5	16,7	14,7	12,0	11,4	11,7	14,0
	10	14,4	17,8	6,6	4,3	-	-
	12,5	16,9	22,1	12,4	13,7	14,1	18,0
	15	14,7	21,4	9,6	6,9	4,9	-
	17,5	14,7	16,9	8,8	-	-	-
	20	14,7	16,3	9,5	6,6	-	-

Tabela 5.39 – Profundidades calculadas “h” (cm) pelo Modelo 2, para o molde 3a(h= 10,0 cm; ω=6 mm; ø=10 mm).

Idade	y (cm)	Combinações "b-a"														
		6-5	6-4	6-3	6-2	6-1	5-4	5-3	5-2	5-1	4-3	4-2	4-1	3-2	3-1	2-1
14 dias	0	12,9	10,6	10,7	-	1,7	9,1	10,2	-	1,1	10,8	-	-	-	-	3,7
	2,5	19,4	13,6	12,3	2,6	3,7	9,6	10,5	-	3,0	11,1	-	2,6	-	1,3	4,1
	5	19,5	13,4	12,8	18,0	20,1	9,4	11,2	17,8	20,2	12,2	21,2	23,9	46,7	42,1	37,0
	7,5	13,8	10,2	12,7	17,3	22,7	7,7	12,4	17,9	24,5	15,4	22,1	34,1	34,9	-	-
	10	17,8	12,7	12,0	11,0	19,9	9,2	10,5	10,2	20,2	11,3	10,4	23,9	9,8	47,0	-
	12,5	9,3	12,9	10,9	11,6	19,1	15,2	11,2	11,9	20,5	8,8	11,2	22,1	12,7	45,5	-
	15	21,0	12,8	11,5	11,5	20,8	7,1	9,1	10,4	20,8	10,1	11,0	25,8	11,6	171	-
	17,5	20,8	12,0	12,0	10,9	20,1	5,4	9,9	9,7	20,0	12,1	10,5	24,8	9,6	50,3	-
	20	21,7	12,9	12,8	17,5	22,7	6,8	10,5	16,8	22,9	12,6	20,4	30,6	36,7	-	-
28 dias	0	-	12,9	9,9	-	1,3	-	-	-	-	6,8	-	-	-	-	2,6
	2,5	17,7	11,1	-	-	4,1	6,2	-	-	3,6	-	-	3,5	1,8	4,9	5,7
	5	8,8	13,4	13,2	3,6	11,0	16,3	14,3	3,0	11,1	12,9	-	10,5	-	10,0	-
	7,5	2,1	8,3	10,8	15,0	17,7	10,7	12,2	16,5	19,4	13,1	18,5	22,0	25,7	30,8	45,7
	10	10,6	11,2	10,3	27,0	18,0	11,6	10,3	33,4	19,0	9,5	199	21,0	-	35,2	8,4
	12,5	-	7,9	8,8	25,4	16,6	12,7	10,8	35,0	18,5	9,6	-	20,0	-	30,1	7,7
	15	17,8	13,2	13,6	38,8	18,1	10,1	12,5	56,6	18,1	14,0	-	20,3	-	24,7	5,6
	17,5	14,7	6,7	12,7	24,4	18,3	-	12,2	27,3	18,7	19,2	147	24,1	-	27,7	10,0
	20	12,4	15,9	15,1	24,6	19,1	18,4	15,8	28,4	20,1	14,2	36,4	20,6	-	25,2	10,9

Tabela 5.40 – Tempos de propagação “T_f” (μs), para o molde 3b (h= 10,0 cm; ω=6 mm; ø=12,5 mm).

Idade	y (cm)	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
		5	10	15	20	25	30	
14 dias	0	25,8	45,4	67,9	108,2	126,8	149,2	4437
	2,5	28,6	49,9	88,6	108,0	129,7	151,6	4207
	5	37,3	50,5	72,7	97,9	129,2	150,6	4317
	7,5	83,8	84,6	90,6	109,8	131,9	154,5	4166
	10	83,7	70,5	86,5	106,0	134,2	151,2	4047
	12,5	86,8	70,8	90,7	108,6	130,3	153,4	4157
	15	84,7	75,7	87,7	109,4	130,8	151,4	4094
	17,5	79,5	67,7	86,0	106,5	132,1	152,6	3700
	20	80,3	67,0	86,7	110,8	129,5	155,0	4034
28 dias	0	29,8	48,9	87,4	109,6	132,7	151,8	4656
	2,5	32,9	51,8	88,6	108,6	130,5	152,2	4303
	5	35,2	41,5	74,1	107,6	128,7	151,0	4094
	7,5	81,5	83,5	90,9	107,2	128,5	150,7	4134
	10	81,9	70,0	87,5	108,0	127,4	152,2	4107
	12,5	82,8	71,9	87,5	109,9	130,7	151,3	4316
	15	88,4	84,7	88,7	110,6	129,7	152,7	4571
	17,5	82,5	85,0	86,5	106,4	129,4	152,2	4145
	20	82,8	84,8	84,9	105,6	127,2	148,5	4050

Tabela 5.41 – Profundidades calculadas “h” (cm) pelo Modelo 1, para o molde 3b (h= 10,0 cm; ω=6 mm; ø=12,5 mm).

Idade	y (cm)	Distância “x” (cm)					
		5	10	15	20	25	30
14 dias	0	2,8	1,2	1,4	13,3	12,9	14,0
	2,5	3,3	3,2	11,1	10,8	10,9	10,8
	5	6,3	4,3	4,6	6,8	12,4	12,5
	7,5	16,7	14,5	11,5	11,1	11,4	11,6
	10	16,2	10,2	9,0	7,8	10,6	6,0
	12,5	17,3	10,8	11,4	10,5	10,4	10,8
	15	16,6	11,8	9,9	10,1	9,6	7,8
	17,5	13,8	7,5	5,3	-	-	-
	20	15,4	9,1	9,0	10,0	7,6	8,8
28 dias	0	4,8	5,4	13,7	15,8	18,1	18,7
	2,5	5,0	4,9	11,8	12,1	12,8	13,1
	5	5,2	-	2,3	9,2	8,3	7,4
	7,5	16,1	14,1	11,3	9,5	9,0	8,4
	10	16,1	10,3	9,9	9,6	7,7	8,8
	12,5	17,2	11,9	11,5	12,7	13,1	12,9
	15	19,6	16,6	13,6	15,5	15,9	17,8
	17,5	16,4	14,5	9,8	9,3	9,7	9,7
	20	16,0	14,0	8,4	7,6	6,2	2,1

Tabela 5.42 – Profundidades calculadas “h” (cm) pelo Modelo 2, para o molde 3b (h= 10,0 cm; ω=6 mm; ø=12,5 mm).

Idade	y (cm)	Combinações “b-a”														
		6-5	6-4	6-3	6-2	6-1	5-4	5-3	5-2	5-1	4-3	4-2	4-1	3-2	3-1	2-1
14 dias	0	9,5	12,4	-	-	1,4	14,2	-	-	1,0	-	-	-	1,0	3,0	3,3
	2,5	11,2	10,7	11,2	-	2,7	10,4	11,2	-	2,4	11,6	-	1,8	-	-	3,4
	5	11,9	-	-	1,2	5,7	-	-	-	5,4	-	3,0	6,2	4,1	6,8	8,1
	7,5	10,7	10,5	11,3	15,6	18,4	10,4	11,5	16,3	19,5	12,2	18,4	22,3	27,4	34,0	62,3
	10	19,9	9,1	10,2	11,1	19,0		7,7	10,0	18,9	11,1	11,7	24,4	12,1	54,0	-
	12,5	9,4	10,1	11,7	10,8	19,7	10,6	12,3	11,0	21,3	13,4	11,0	25,3	9,7	46,4	-
	15	13,6	12,1	10,8	12,9	19,3	11,1	10,1	12,8	20,2	9,5	13,3	23,2	16,3	52,4	-
	17,5	14,0	8,6	9,4	9,8	17,3	4,2	8,3	9,3	17,8	10,1	10,2	21,1	10,2	33,9	-
	20	3,3	11,1	9,1	9,2	17,2	14,7	10,0	9,6	18,7	7,2	8,5	19,7	9,2	34,4	-
28 dias	0	16,3	12,0	10,5	-	3,2	9,1	9,0	-	2,6	9,0	-	2,2	-	1,1	4,4
	2,5	11,8	10,9	11,0	2,2	4,2	10,3	10,8	-	4,0	11,1	-	3,6	-	2,6	5,1
	5	10,3	10,8	-	-	5,0	11,1	-	-	4,8	-	-	4,5	-	5,8	12,9
	7,5	10,4	10,6	12,7	16,0	18,3	10,7	13,3	16,8	19,5	14,9	19,0	22,1	24,0	28,2	38,5
	10	4,3	10,3	10,4	10,7	18,2	13,2	11,5	11,3	19,9	10,5	10,8	22,0	11,1	37,3	-
	12,5	13,6	12,6	10,7	11,5	18,7	12,0	10,0	11,3	19,4	8,8	11,2	21,6	12,6	41,1	-
	15	9,3	12,3	10,9	16,0	20,4	14,1	11,2	17,0	22,3	9,5	18,0	25,3	34,5	171	-
	17,5	9,6	8,8	9,9	16,2	18,4	8,3	9,9	17,3	19,6	10,8	20,7	23,2	58,4	44,6	34,6
	20	11,5	10,6	10,1	16,9	19,2	9,9	9,8	17,9	20,4	9,7	21,1	23,9	230	62,2	38,8

Tabela 5.43 – Tempos de propagação “ T_f ” em (μ s), para o molde 3c ($h= 10,0$ cm; $\omega=6$ mm; $\phi=16$ mm).

Idade	y (cm)	Distância “x” (cm)						Vel. (m/s)
		5	10	15	20	25	30	
14 dias	0	26,3	46,8	64,6	84,7	138,7	154,1	4132
	2,5	29,2	48,9	70,5	86,7	127,2	151,4	4145
	5	35,7	55,3	71,8	110,8	133,8	158,1	4293
	7,5	88,2	62,9	79,2	112,2	132,5	154,2	3937
	10	89,7	71,9	87,2	105,4	132,2	151,8	4103
	12,5	87,9	86,8	92,8	108,8	127,5	150,8	4209
	15	86,3	85,7	88,0	104,8	130,0	152,9	4107
	17,5	86,1	88,8	87,0	109,8	127,2	147,6	3714
	20	87,2	70,0	85,0	105,0	127,8	147,2	4194
	28 dias	0	25,5	45,2	65,8	87,8	126,4	157,7
2,5		31,7	50,6	89,9	109,7	130,6	179,9	4435
5		84,4	57,9	91,8	112,8	132,4	150,7	4319
7,5		101,0	108,2	90,7	110,5	129,8	148,7	4226
10		81,5	112,2	84,7	107,6	130,8	149,2	4260
12,5		81,1	111,2	84,7	105,4	128,9	146,0	4280
15		83,7	71,5	85,9	106,4	129,7	152,0	4183
17,5		85,5	111,6	89,6	107,1	127,0	151,9	4191
20		91,6	126,3	89,7	108,1	129,9	150,5	4185

Tabela 5.44 – Profundidades calculadas “h” (cm) pelo Modelo 1, para o molde 3c ($h= 10,0$ cm; $\omega=6$ mm; $\phi=16$ mm).

Idade	y (cm)	Distância “x” (cm)					
		5	10	15	20	25	30
14 dias	0	2,1	-	-	-	14,0	10,7
	2,5	3,4	1,6	-	-	8,4	9,2
	5	5,8	6,4	3,5	12,9	14,1	15,9
	7,5	16,6	7,3	4,3	9,4	7,4	4,6
	10	17,7	10,8	9,7	8,2	10,5	8,4
	12,5	17,8	15,3	12,5	11,1	9,7	10,4
	15	17,0	14,5	10,1	7,9	9,4	9,3
	17,5	15,2	13,1	6,0	4,0	-	-
	20	17,6	10,7	9,6	9,2	9,7	7,3
	28 dias	0	2,5	-	-	-	11,7
2,5		4,9	5,1	13,1	13,8	14,6	26,3
5		17,5	7,5	13,0	13,9	13,9	12,6
7,5		20,7	20,6	11,9	12,0	11,3	9,3
10		16,6	21,7	10,0	11,2	12,3	10,5
12,5		16,6	21,6	10,2	10,4	11,7	8,7
15		16,8	11,1	9,9	9,8	10,5	10,5
17,5		17,2	21,1	11,3	10,2	9,1	10,6
20		18,5	24,5	11,3	10,6	10,7	9,6

Tabela 5.45 – Profundidades calculadas “h” (cm) pelo Modelo 2, para o molde 3c (h= 10,0 cm; ω =6 mm; ϕ =16 mm).

Idade	y (cm)	Combinações "b-a"														
		6-5	6-4	6-3	6-2	6-1	5-4	5-3	5-2	5-1	4-3	4-2	4-1	3-2	3-1	2-1
14 dias	0	23,4	-	-	-	1,1	-	-	-	-	4,3	5,6	3,9	6,2	3,8	3,1
	2,5	5,9	-	-	-	3,0	-	-	-	2,9	10,8	6,3	4,8	4,0	4,1	4,1
	5	8,3	9,1	-	3,4	4,7	9,5	-	2,9	4,6	-	-	4,3	9,1	6,4	5,3
	7,5	12,3	12,8	4,1	7,7	20,0	13,0	-	7,3	21,3	-	6,1	24,1	10,7	-	-
	10	15,4	8,1	10,4	11,5	21,1	-	9,1	11,0	22,1	12,4	12,7	31,0	12,9	-	-
	12,5	8,0	12,0	13,7	17,2	20,6	14,2	15,0	18,8	22,8	15,6	20,6	26,1	27,8	41,5	-
	15	9,6	6,6	10,5	16,3	19,6	4,2	10,6	17,4	21,2	13,9	22,5	27,7	46,9	70,7	-
	17,5	13,0	14,8	11,6	18,8	20,6	16,1	11,3	20,0	22,0	8,4	21,6	24,0	-	97,4	34
	20	14,7	10,9	10,6	11,6	21,2	8,2	9,6	11,2	22,3	10,4	11,8	28,4	12,8	-	-
28 dias	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7	2,9	3,1	3,4	3,2	3,2	
	2,5	-	-	-	-	1,7	11,8	11,6	-	3,5	11,5	-	3,0	-	1,8	4,8
	5	17,5	15,4	13,2	6,2	19,4	14,0	12,1	4,9	19,6	10,9	2,7	21,3	-	32,7	-
	7,5	16,0	14,7	13,2	28,3	26,9	13,9	12,5	33,1	29,9	11,7	83,0	43,3	-	-	22
	10	17,0	11,9	9,8	30,7	18,6	8,4	8,0	36,9	18,9	7,8	-	21,9	-	49,7	7,7
	12,5	18,6	12,0	10,8	31,7	19,1	7,3	8,9	37,8	19,2	9,7	-	22,8	-	46,7	7,8
	15	10,6	9,0	9,6	11,3	18,9	7,9	9,4	11,4	20,1	10,1	12,1	24,2	13,5	61,1	-
	17,5	3,7	9,7	11,6	29,0	19,5	12,4	13,1	41,0	21,7	13,5	-	25,2	-	44,9	9,0
	20	13,4	11,5	12,1	42,5	22,1	10,3	11,8	94,8	23,8	12,7	-	30,5	-	-	7,6

A distância “y” nas Tabelas 5.37 a 5.45 indica a que distância estava a linha de leituras paralela a barra de aço embutida. Para (y=0 cm) a linha de leituras foi realizada em cima da barra de aço embutida, os demais valores de “y” são medidas do eixo da armadura embutida às linhas de leituras.

Analisando os resultados das profundidades estimadas pelo Modelo 1, nas Tabelas 5.38 (ϕ =10 mm), 5.41 (ϕ =12,5 mm) e 5.44 (ϕ =16 mm), as barras de aço embutidas influenciaram as estimativas nas linhas de leitura mais próximas da barra. As estimativas que possivelmente foram influenciadas pela presença das barras de aço embutidas estão sombreadas nas Tabelas 5.38 a 5.45.

Para a barra embutida de 10 mm de diâmetro, a influência foi notória na linha distante 2,5 cm do eixo da barra, até a distância “x” de 10 cm. Pequenos indícios de influência puderam ser observados, aos 28 dias, nos Modelos 1 e 2 para a linha distante 5 cm do eixo da barra, nas Tabelas 5.38 e 5.39.

Para a barra embutida de 12,5 mm de diâmetro, a influência foi maior, até a linha distante 5 cm do eixo da barra e alterando parte das estimativas até (x=20 cm). Porém, para maiores valores de “x”, a influência chega a ser menor,

ou inexistente. O que dá a entender que por vezes o pulso, mesmo próximo da barra de aço, não se propaga por ela.

Para a barra embutida de 16 mm de diâmetro a influência foi um pouco maior que as demais, até a distância de 7,5 cm do eixo da armadura à linha de leituras houve influência nas estimativas.

Pode-se verificar nas estimativas apresentadas nas Tabelas 5.38 ($\varnothing=10$ mm), 5.41 ($\varnothing=12,5$ mm) e 5.44 ($\varnothing=16$ mm), quando para valores de ($y=2,5$ cm) a profundidade estimada pelo Modelo 1 se situa em torno de 3,3 cm ou retorna raiz negativa, o que indica que os triângulos simétricos do percurso do pulso, da Figura 2.26, não têm seu ponto inferior na parte mais baixa da fenda, mas em algum ponto no qual a barra de aço atravessa a fenda. O mesmo pode ser observado para profundidades estimadas de cerca de 5 cm nas linhas de leituras ($y=5$ cm).

A partir de distâncias maiores ($y>10$ cm) não foi observada nenhuma influência significativa da presença de armaduras na estimativa das profundidades das fendas.

Apesar de o Modelo 2 fornecer estimativas mais dispersas, pode-se observar nas combinações que tem uma das leituras próxima das fendas ($a=1$ ou 2, ou seja, distância entre o eixo do transdutor ao centro da fenda de 5 ou 10 cm), nas linhas de leitura mas próximas da barra ($y=0$ até 5 cm) os valores estimados são próximos dos valores de “y”.

Uma última maneira de afirmar até aonde as estimativas foram influenciadas pelas armaduras é observar o aumento nos valores apresentados nas Tabelas 5.38 a 5.45 para valores de ($x=5$ cm e correspondentes leituras nas combinações 6-1, 5-1, 4-1, 3-1, 2-1) com o aumento do valor de “y”. Nas estimativas dos demais moldes deste estudo sem barras de aço embutidas, sistematicamente nas leituras realizadas próximas das fendas, os valores obtidos por ambos os Modelos era muito superior ao valor real das profundidades. Conforme se afastam as linhas de leitura das barras de aço embutidas ($y>7,5$ cm) as estimativas próximas das fendas voltam a fornecer valores muito distantes dos reais.

Para ilustrar como foram obtidas as velocidades indiretas dos moldes da Série 3, no Anexo B encontram-se os tempos obtidos, mostrando como exemplo o molde 3b.

Apesar de não ser o foco principal desta Série 3 verificar a profundidade das fendas ($h=10$ cm), podem-se confirmar algumas tendências observadas na Série 2, onde as armaduras não influenciaram os resultados ($y>10$ cm). No molde 3a ($\varnothing=10$ mm), aos 14 dias, para $y=12,5$ cm, velocidade de 4596 m/s; $y=15$ cm, velocidade de 4485 m/s; aos 28 dias, $y=12,5$ cm, velocidade 4525 m/s as estimativas resultaram todas acima do valor real, devido à maior velocidade, o tempo " T_c " é menor (Equação 4.1) e a raiz quadrada da Equação 2.18 é maior, resultando em profundidade estimada maior. Por sua vez, velocidades menores levaram a estimativas menores que as reais para a distância " x " maiores ou iguais a 15 cm como pode-se verificar aos 28 dias para: $y=5$ cm, velocidade de 3840 m/s; $y=10$ cm, velocidade de 3809 m/s; $y=15$ cm, velocidade de 3895 m/s; $y=17,5$ cm, velocidade de 3852 m/s; $y=20$ cm, velocidade de 3800 m/s. Isto confirma a sensibilidade do Modelo 1 a alterações na velocidade. O mesmo ocorre no molde 3b ($\varnothing=12,5$ mm) para $y=17,5$ cm aos 14 dias e $y=15$ cm aos 28 dias. Assim como, no molde 3c ($\varnothing=16$ mm), para $y=17,5$ cm aos 14 dias.

Concluídas as leituras nas três Séries de moldes, ficou uma dúvida quanto à real influência da distância " x " do eixo dos transdutores ao centro da fenda.

Para esclarecer esta dúvida decidiu-se então, escolher um molde de cada profundidade onde ainda havia esta dúvida ($h_{real}=7,5, 10, 15$ e 22 cm) e repetir o ensaio refinando a malha de leituras a cada um centímetro. Foram escolhidos os moldes 2a1 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm), 2b4 ($h=10$ cm; $\omega=6$ mm), 1e ($h=15$ cm; $\omega=$ mm), e 1f ($h=22$ cm; $\omega=3$ mm). Os moldes 1e e 1f foram cortados, com serra circular refrigerada com água, de tal forma a eliminar a fina camada de concreto que fechava uma das laterais. Foi tomado o cuidado para que a serra não avançasse no concreto íntegro na parte inferior das fendas. Estes dois moldes foram mantidos por 48h a sombra no laboratório, após o corte, até a realização dos ensaios. Na data dos ensaios os moldes 1e e 1f

havia sido concretados a cerca de 180 dias. Os moldes 2a1 e 2b4 haviam sido concretados a pouco menos de 90 dias.

Na Tabela 5.46 são apresentados os tempos de propagação “ T_f ”, e as profundidades estimadas “ h ” para as leituras realizadas em uma malha refinada de centímetro em centímetro, para cada um dos moldes supracitados, adotando o Modelo 1, com uma velocidade de referência “ V_c ” de 4200 m/s. Para a molde 1e não foi possível realizar leituras além do valor de ($x=25$ cm).

Tabela 5.46 – Profundidades calculadas “ h ” para os moldes 2a1 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm), 2b4 ($h=10,0$ cm; $\omega=6$ mm), 1e ($h=15,0$ cm; $\omega=3$ mm) e 1f ($h=22,0$ cm; $\omega=3$ mm) em uma malha refinada de 1 em 1 centímetro.

x (cm)	$h_{\text{real}} = 7,5$ cm		$h_{\text{real}} = 10,0$ cm		$h_{\text{real}} = 15,0$ cm		$h_{\text{real}} = 22,0$ cm	
	T_f (μs)	h (cm)	T_f (μs)	h (cm)	T_f (μs)	h (cm)	T_f (μs)	h (cm)
5	86,3	17,4	98,5	20,1	109,1	22,4	152,0	31,5
6	91,0	18,1	101,2	20,4	110,3	22,4	154,3	31,8
7	51,9	8,4	105,6	21,0	115,2	23,2	159,8	32,8
8	54,1	8,1	111,3	22,0	119,7	23,8	163,2	33,3
9	56,3	7,7	67,6	11,0	124,2	24,5	169,7	34,5
10	59,7	7,6	69,7	10,7	130,1	25,4	172,3	34,8
11	64,0	7,7	72,2	10,4	136,7	26,5	171,5	34,3
12	66,9	7,3	76,4	10,6	147,1	28,5	163,2	32,1
13	71,4	7,5	79,4	10,4	116,4	20,7	158,6	30,7
14	75,4	7,4	85,1	11,1	115,5	19,8	160,6	30,7
15	80,3	7,7	88,7	11,0	99,0	14,4	164,3	31,1
16	83,7	7,3	90,7	10,3	103,6	14,7	164,5	30,6
17	89,0	7,8	94,2	10,1	108,6	15,2	166,4	30,5
18	92,6	7,3	97,5	9,8	109,4	14,3	168,1	30,4
19	98,1	8,0	100,4	9,1	116,4	15,4	171,0	30,5
20	101,7	7,5	107,1	10,3	120,4	15,5	173,1	30,4
21	107,2	8,1	109,8	9,5	121,5	14,5	175,4	30,3
22	111,2	7,8	113,9	9,4	125,8	14,6	177,0	30,0
23	114,7	7,2	118,0	9,2	131,4	15,2	150,0	21,5
24	119,7	7,5	122,2	9,1	133,7	14,6	159,2	23,3
25	119,5	2,2	128,3	10,0	138,3	14,8	158,2	21,9
26	121,8	-	131,8	9,5			162,1	22,0
27	127,4	-	136,7	9,8			167,4	22,5
28	133,5	1,4	143,6	11,2			167,2	21,2
29	137,2	-	146,8	10,5			171,1	21,2
30	141,5	-	150,6	10,0			180,2	23,1

Com base nos valores de “ h ” apresentados na Tabela 5.46, pode-se verificar que existe mesmo uma relação quase unitária entre a distância “ x ” e a profundidade “ h ”. Para a fenda de 7,5 cm de profundidade, a estimativa

retornou valores dentro da precisão escolhida para este trabalho de 20% a partir do valor de “x” maior que 7 cm.

Na fenda ($h=10$ cm) a estimativa foi boa a partir do valor de “x” maior que 9 cm; Para ($h=15$ cm) a estimativa se aproximou do valor real a partir de ($x=15$ cm) e por fim para a fenda com profundidade de 22 cm, a partir do valor de “x” maior do que 23 cm as estimativas se adequaram a precisão esperada.

Da Tabela 5.46 pode-se afirmar que o Modelo 1 funcionou bem quando o ângulo entra a linha imaginária que liga o centro do transdutor à parte inferior da fenda ao eixo da fenda, na Figura 2.26, foi maior que 45° .

Pode-se observar, para a fenda de 7,5 cm de profundidade, que a partir da distância “x” maior do que 25 cm não houve mais uma estimativa precisa, o que sugere que para leituras muito afastadas das fendas, os Modelos de cálculo utilizados neste trabalho podem não fornecer estimativas dentro de uma precisão adequada. Tal situação ficou demonstrada anteriormente nas Tabelas 5.3 e 5.5 para os moldes 1a ($h=2,5$ cm; $\omega=6$ mm) e 1b ($h=5$ cm; $\omega=6$ mm).

5.5 Preenchimento das Fendas

- **Preenchimento Completo**

Como última etapa deste programa experimental, alguns moldes tiveram suas fendas induzidas preenchidas com resinas epóxi, a fim de avaliar se repetidos os procedimentos para detecção e estimativa da profundidade das fendas, a técnica seria capaz de certificar que a fenda foi preenchida por completo.

A verificação do preenchimento pode ser feita de duas maneiras. Primeiro comparando os gráficos de Tempo de propagação *versus* Distância entre os transdutores, conforme descrito no item 4.7.1, feitos antes e depois da fenda ser preenchida. As Figuras 5.4 e 5.5 ilustram, para os moldes 2a3 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm) e 2b3 ($h=10$ cm; $\omega=6$ mm), a diferença dos gráficos antes e depois do preenchimento com resina epóxi. A Figura 5.6 mostra um corte do

molde 2a3, mostrando o preenchimento, confirmando a profundidade de 7,5 cm e no caso deste corte a abertura da fenda esta próxima de 5 mm.

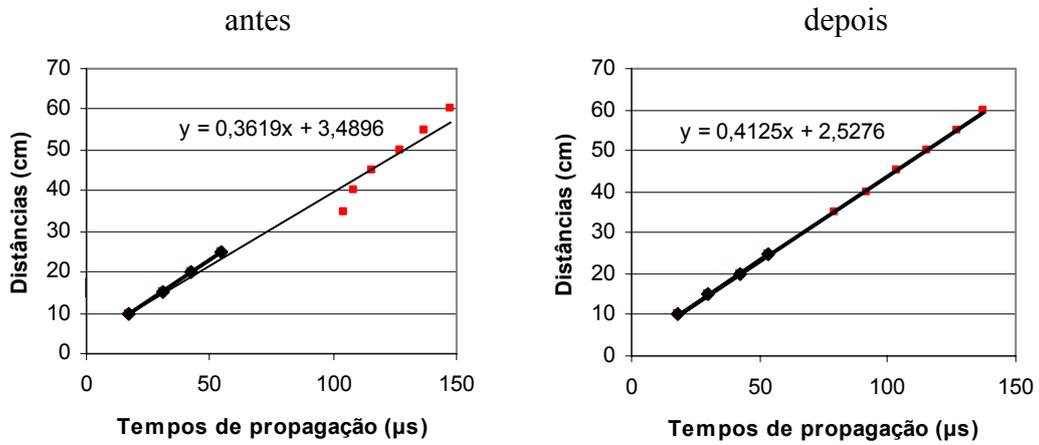


Figura 5.4 – Detecção de fenda para o molde 2a3 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm), antes e depois do preenchimento com resina epóxi altamente fluida.

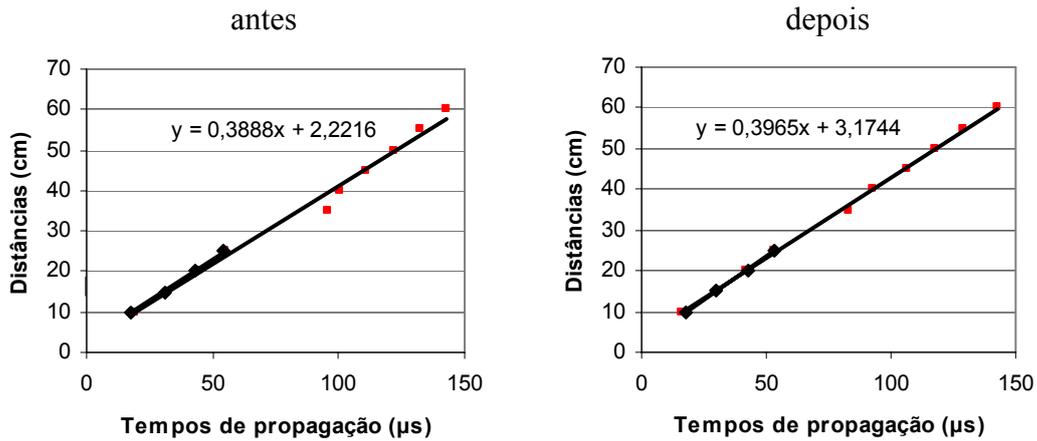


Figura 5.5 – Detecção de fenda para o molde 2b3 ($h=10,0$ cm; $\omega=6$ mm), antes e depois do preenchimento com resina epóxi altamente fluida.

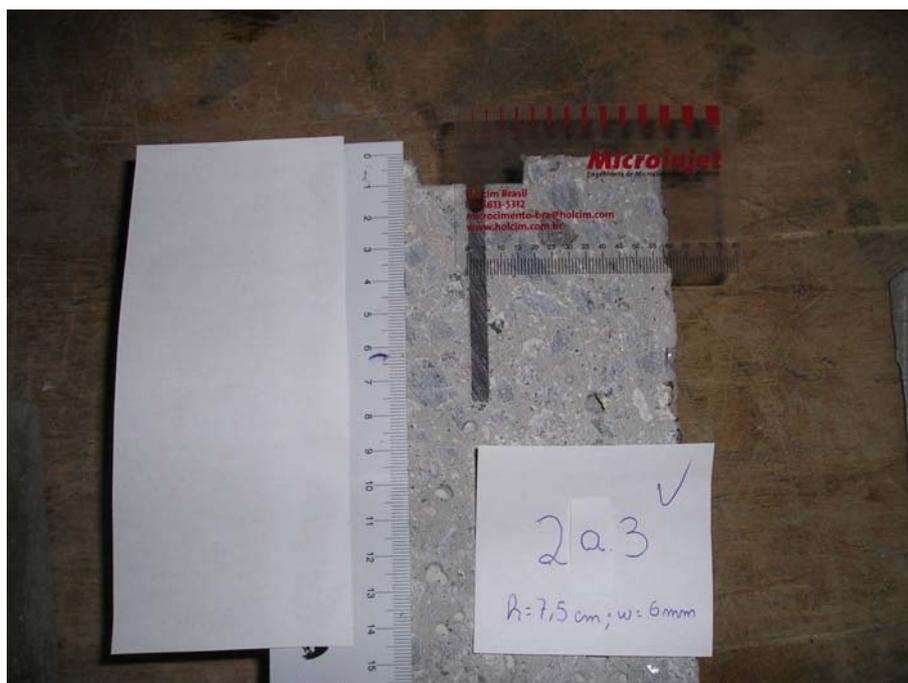


Figura 5.6 – Corte do molde 2a3 (h=7,5 cm; ω =6 mm).

Nas Figuras 5.4 e 5.5, pode-se observar que existe um ponto distante da reta que melhor se ajusta aos pontos, além da reta não estar perfeitamente alinhada aos mesmos, para a situação antes do preenchimento. Depois do preenchimento os pontos se ajustam melhor a reta, além da velocidade obtida pelo coeficiente angular desta reta ser superior à velocidade obtida no gráfico antes do preenchimento.

A outra forma de verificar se a fenda foi preenchida é procurar estimar a profundidade da fenda pelos Modelos de cálculo utilizados neste Capítulo. No caso, se o tempo de propagação " T_f " for menor que o tempo " T_c " para a mesma distância entre transdutores, a estimativa da profundidade feita pelo Modelo 1 retornará raiz negativa, pela Equação 2.18. Desta forma o procedimento indica que não existe fenda ou existe uma falha pequena, a qual o ultra-som não consegue detectar. A Tabela 5.47 apresenta os tempos " T_f " e " T_c ", para uma velocidade de referência " V_c " de 4200 m/s, obtidos antes e depois das fendas preenchidas, nos moldes 2a3 (h=7,5 cm; ω =6 mm), 2b3 (h=10 cm; ω =6 mm), e 2f (h=15 cm; ω =0,5 mm).

Tabela 5.47 – Tempos de propagação “ T_f ” antes e depois do preenchimento com resina epóxi, para os moldes 2a3, 2b3 e 2f.

x (cm)	T_f (μ s)						T_c (μ s)
	2a3 (h=7,5 cm; ω =6 mm)		2b3 (h=10,0 cm; ω =6 mm)		2f (h=15,0 cm; ω =0,5 mm)		
	antes	depois	antes	depois	antes	depois	
5	80,3	20,6	94,9	23,7	70,0	21,9	23,8
10	60	42,4	139,9	43,9	81,3	44,2	47,6
15	78,6	66,3	92,5	68,8	114,1	67,5	71,4
20	105,6	89,7	115,6	92,8	121,5	89,9	95,2
25	124,2	114,4	138,7	118,1	139,7	115,1	119,0
30	147,8	139,4	159,2	145,2	160,2	141,8	142,9

A Figura 5.7 mostra um corte do molde 2f, mostrando o preenchimento, confirmando a profundidade de 15 cm. Na Figura 5.8 pode-se observar que a abertura da fenda, já preenchida com resina epóxi altamente fluida, no interior do concreto é menor do que 0,4 mm.

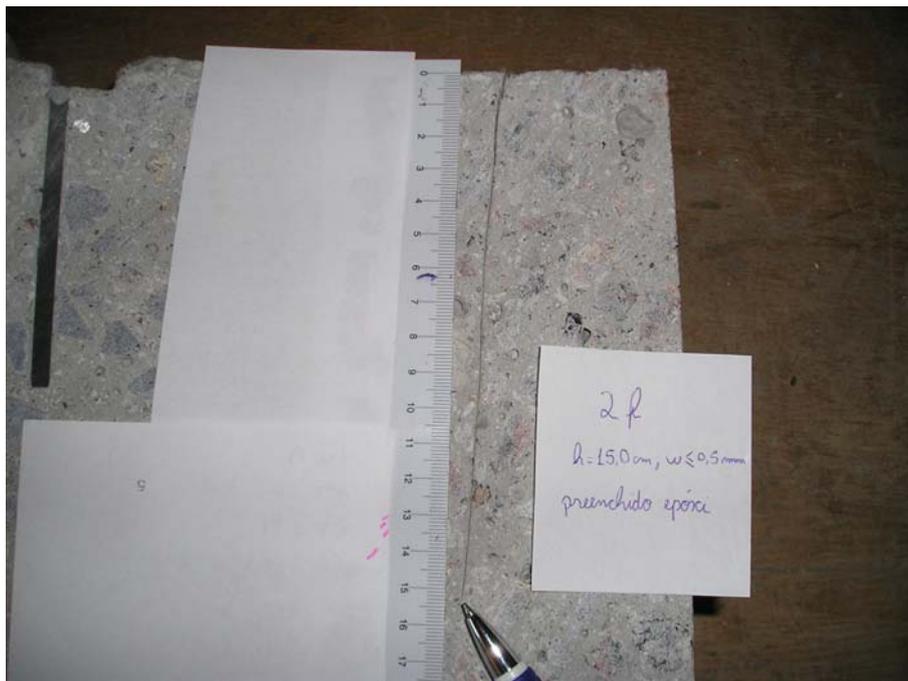
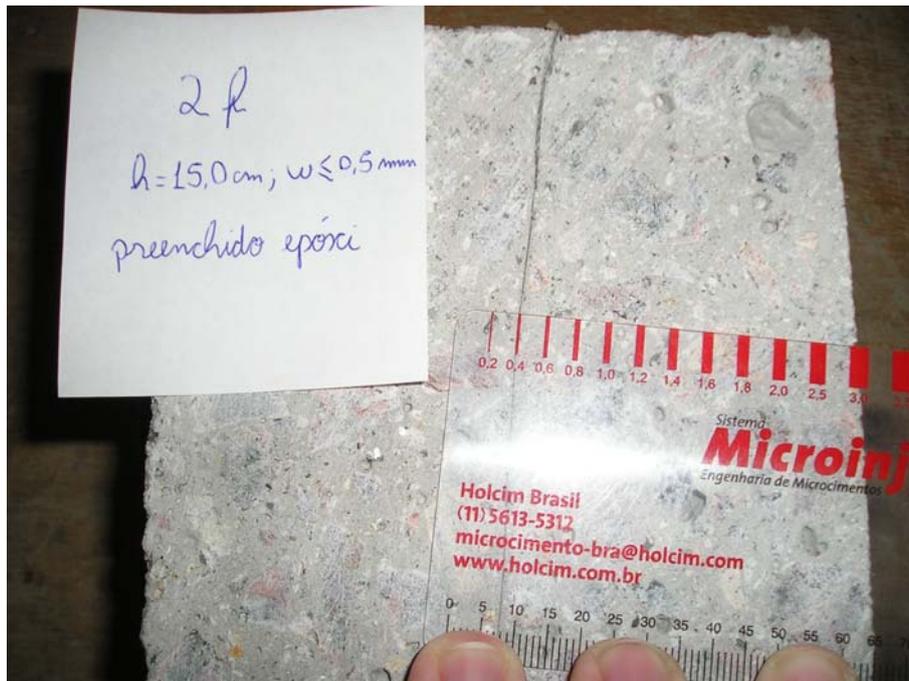


Figura 5.7 – Corte do molde 2f (h=15,0 cm; ω =0,5 mm). Preenchimento completo com resina epóxi altamente fluida.



**Figura 5.8 – Corte do molde 2f ($h=15,0$ cm; $\omega=0,5$ mm).
Abertura interna menor do que 0,4 mm verificada com fissurômetro.**

Os dois procedimentos descritos acima mostram que não foi possível detectar a fenda, nem estimar sua profundidade depois que a mesma foi preenchida com resina epóxi altamente fluida.

- **Preenchimento Parcial**

A Tabela 5.48 apresenta os tempos " T_f " e " T_c ", para uma velocidade de referência " V_c " de 4200 m/s, obtidos antes e depois das fendas preenchidas parcialmente, com resina epóxi fluida, deixando vazios de 2,5 e 5 cm no fundo das fendas, nos moldes 2a2 e 2a4 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm), como ilustrou a Figura 4.16. A Figura 5.9 mostra um corte do molde 2a2, mostrando o preenchimento superficial de 2,5 cm, confirmando a profundidade de 7,5 cm.

Tabela 5.48 – Tempos de propagação “ T_f ” antes e depois do preenchimento com resina epóxi, para os moldes 2a2 e 2a4 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm).

x (cm)	T_f (μ s)				T_c (μ s)
	2a2		2a4		
	Antes	Depois	Antes	Depois	
5	84,5	21,0	80,9	22,2	23,8
10	62,6	44,1	66,1	46,3	47,6
15	78,6	66,5	83,1	70,0	71,4
20	102,2	90,6	109,2	94,7	95,2
25	126,7	113,7	129,6	117,5	119,0
30	149,3	137,3	153,2	140,3	142,9

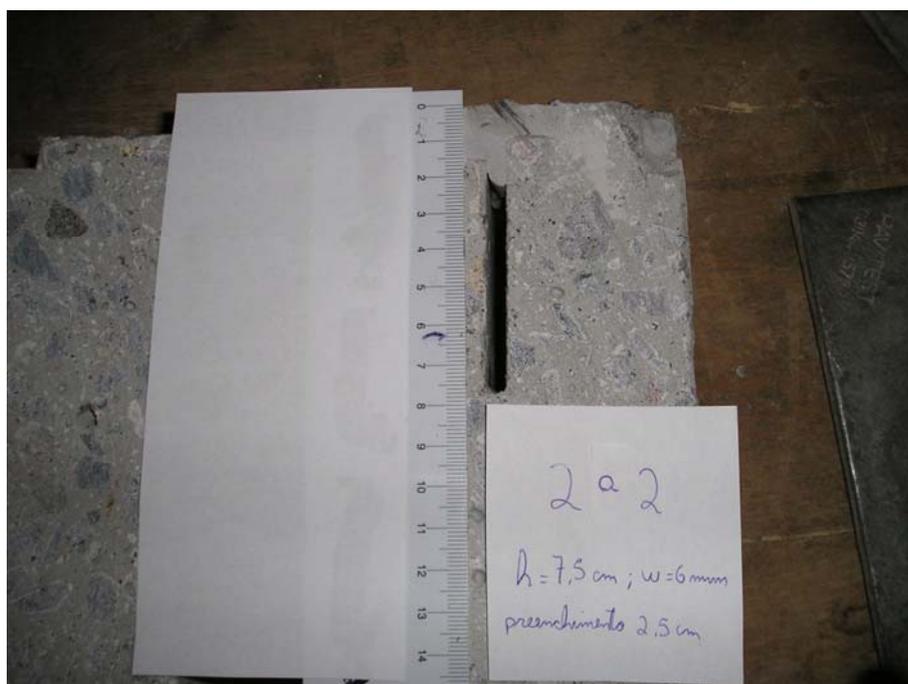


Figura 5.9 – Corte do molde 2a2 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm). Preenchimento superficial de 2,5 cm com resina epóxi fluida.

De acordo com os procedimentos descritos anteriormente no item 4.7.2, para os dados apresentados na Tabela 5.48, não é possível estimar a profundidade destas fendas pois a diferença ($T_f - T_c$) é negativa. Tal situação mostra que o ultra-som não consegue diferenciar fendas completamente preenchidas de fendas parcialmente preenchidas.

Foi obtida a velocidade pelo modo de transmissão direto em moldes de 5 x 5 x 10 cm das resinas epóxi fluida e altamente fluida, da ordem de 2800 e 2300 m/s respectivamente.

- **Preenchimentos mal executados ou inapropriados**

A Tabela 5.49 apresenta os tempos “ T_f ” obtidos antes e depois de preencher a fenda do molde 2h (h=7,5 cm; $\omega=25$ mm) com argamassa pobre e espuma de poliuretano. Como os tempos “ T_f ” foram muito superiores aos tempos “ T_c ” a Tabela 5.49 apresenta as profundidades estimadas, pelo Modelo 1, para as situações com e sem argamassa e espuma.

Tabela 5.49 – Tempos de propagação “ T_f ” antes e depois do preenchimento com argamassa pobre e espuma de poliuretano, para o molde 2h (h=7,5 cm; $\omega=25$ mm) e profundidades calculadas “ h ”.

x (cm)	T_f (μ s)				Profundidades calculadas “h” (cm)			
	argam. pobre		Espuma		argam. pobre		espuma	
	sem	com	sem	com	sem	com	sem	com
5	47,7	47,8	48	47,7	8,7	8,7	9,0	9,0
10	56,8	59,1	60,3	59,4	6,5	7,3	8,3	8,0
15	78,1	79,2	77,4	78,6	6,6	7,1	7,3	7,9
20	99,1	98,2	100,1	100,2	5,7	4,9	8,1	8,1
Vel Ref.	4195 m/s		4308 m/s		4195 m/s		4308 m/s	

Praticamente não houve alteração na estimativa das profundidades com o preenchimento da espuma de poliuretano, nem com a argamassa pobre, como mostram os dados da Tabela 5.49.

- **Preenchimento com água**

A Tabela 5.50 apresenta os tempos “ T_f ” obtidos antes e depois de preencher a fenda do molde 2h com água, mais uma vez como os tempos “ T_f ” foram muito superiores aos tempos “ T_c ”, foram calculadas as profundidades das fendas utilizando o Modelo 1.

Tabela 5.50 – Tempos de propagação “ T_f ” antes e depois do preenchimento com água, para o molde 2h (h=7,5 cm; ω =25 mm) e profundidades calculadas “ h ”.

x (cm)	T_f (μ s)		Profundidades calculadas "h" (cm)	
	Sem água	com água	sem água	com água
5	45,9	45,1	8,6	8,5
10	59,2	58,5	8,1	7,9
15	76,7	75,5	7,3	6,8
20	95,2	94,8	5,3	5,2
Vel Ref.	4349 m/s	4360 m/s	4349 m/s	4360 m/s

Os dados da Tabela 5.50 mostram que o método não foi capaz de distinguir quando a fenda estava preenchida com água.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

Este capítulo apresenta as conclusões retiradas da análise dos resultados expostos no Capítulo 5, levando em conta a detecção de fendas superficiais induzidas e a estimativa da profundidade das mesmas, dividindo-se em 3 Séries: quanto a diferentes profundidades de fendas, diferentes aberturas e a influência das barras de aço.

Cumprindo com o objetivo geral deste trabalho, ficou provado que o ultra-som, através do modo de transmissão indireto, consegue estimar a profundidade de fendas superficiais perpendiculares à superfície, sendo possível distinguir pela análise dos resultados fendas de profundidades distintas.

Mesmo a variabilidade do ensaio de ultra-som sendo maior pelo modo de transmissão indireto em comparação ao modo de transmissão direto, oscilando em torno de 1% a 5% nas leituras individuais, e indicando velocidades de propagação da onda ultra-sônica variando até no máximo 10%, os Modelos matemáticos sugeridos na literatura para estimar a profundidade de fendas são utilizáveis. Entretanto, há limitações quanto à disposição da malha de leituras realizadas em torno da fenda para estas estimativas, como descrito a seguir.

- **Profundidades diferentes**

O método do ultra-som consegue estimar a profundidade de diferentes fendas, porém para fendas muito rasas, da ordem de 2,5 cm de profundidade, esta estimativa não é precisa.

Adotando uma precisão de 20%, foi possível estimar a profundidade de fendas de 5 até 22 cm, contudo os resultados indicam uma relação máxima e mínima de profundidade da fenda “*h*” sobre a distância do eixo dos transdutores ao centro da fenda “*x*” de tal forma que as estimativas são possíveis para relações de $x / h > 1,0$ até $x / h < 4,0$.

Esta relação mínima unitária foi observada em diversos moldes de concreto deste trabalho, com fendas de profundidades de 5, 7,5, 10, 15 e 22 cm. Porém esta relação máxima da distância “*x*” igual a quatro vezes a profundidade, ficou apenas indicada pelos moldes com fendas de 5 e 7,5 cm, pois para verificar esta tendência para maiores profundidades seriam necessários moldes de 1 metro de comprimento ou mais, o que não foi viável neste trabalho.

- **Aberturas diferentes**

Mesmo para aberturas superficiais menores que 1 mm, chegando a 0,2 mm, foi possível estimar a profundidade das fendas. Não houve diferenças quando se estimou fendas com a mesma profundidade e aberturas variando de 0,1 mm a 25 mm.

- **Influência das barras de aço**

Ficou provado que barras de aço paralelas à direção das leituras com o ultra-som pelo modo de transmissão indireto, podem prejudicar a estimativa da profundidade das fendas. Esta influência se dissipou quando se afastou a linha de leituras do eixo da barra em pelo menos 10 cm.

Os resultados indicaram que a influência é maior para barras de aço de maior diâmetro. Entre os diâmetros utilizados ($\varnothing = 10, 12,5, 16$ mm) a influência foi maior para o diâmetro de 16mm.

- **Preenchimento das fendas**

O ultra-som não foi capaz de identificar, pelos Modelos matemáticos adotados neste trabalho, quando uma fenda foi preenchida por completo, com material adequado para reparo, como resinas epóxi, ou apenas selada superficialmente. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que se uma fenda superficial for fechada somente na superfície por material rígido adequado, o pulso não mais contornará a fenda pelo seu ponto mais baixo, e sim desviará pelo menor caminho passando pelo material selante rígido, mesmo que a espessura deste material selante seja pequena, menor do que 2,5 cm.

No caso de ocupar o vazio da fenda com material poroso contendo um grande número de vazios, por exemplo argamassa pobre ou espuma de poliuretano, o pulso não atravessa este caminho poroso e continua desviando da fenda por baixo da mesma, podendo assim continuar a estimar sua profundidade. Pois a velocidade do som na argamassa pobre ou espuma de poliuretano é muito menor que a velocidade do som no concreto. O ultra-som também não conseguiu detectar a presença da água, quando esta foi utilizada para preenchimento.

- **Modelos**

Foram utilizados dois Modelos de cálculo semelhantes na estimativa das profundidades das fendas neste trabalho. Para a geometria dos moldes confeccionados, o Modelo 1 se mostrou mais eficaz. Porém este modelo não funcionou bem para distâncias muito próximas das fendas, como citado anteriormente. Este modelo é sensível a alterações na velocidade indireta utilizada. A faixa de velocidades indiretas obtidas neste trabalho, em geral, esteve entre 3750 e 4250 m/s. Quando foram obtidas e utilizadas velocidades menores, as estimativas ficaram abaixo do valor real. Quando foram obtidas e utilizadas velocidades maiores, as profundidades calculadas foram superestimadas.

No Modelo 2, a sugestão da norma BS 1881: Part 203 (1986), de afastar os transdutores simétricos à fenda de 15 e 30 cm, forneceu melhores resultados. Foram realizadas combinações de distâncias menores do que as sugeridas pela norma, porém somente as combinações que tiveram distâncias entre transdutores, e entre a fenda e o transdutor, maiores do que 10 cm forneceram resultados próximos dos reais. As combinações de posição dos transdutores muito próximas não forneceram estimativas coerentes.

A técnica apresentada por fim se mostrou eficaz para estimar a profundidade de fendas de geometria conhecida, perpendiculares à superfície e retilíneas. Contudo a aplicação prática desta técnica pode ser mais complicada, devido à geometria irregular de fissuras, trincas e fendas em estruturas reais e da regularidade da superfície de ensaios. Várias linhas de leitura podem ser necessárias, com malha refinada de poucos centímetros (de 1 a 5 cm no máximo), para poder estimar a profundidade de uma fissura, trinca ou fenda em uma estrutura real.

A idade não foi uma variável influente neste trabalho, visto que a partir dos 7 dias já foi possível obter resultados dentro da precisão adotada.

Ficou claro que o ultra-som é capaz de estimar a profundidade de fendas, nos casos em que não exista um menor percurso entre o par de transdutores simétricos à fenda do que passando por baixo da mesma. Se houver um menor percurso, mesmo que superficial, onde o pulso contorne a fenda pela lateral, o ultra-som não consegue fornecer resultados que indiquem a profundidade da fenda.

6.2 Sugestão para Trabalhos Futuros

Procurar testar os modelos matemáticos utilizados neste trabalho em fendas de estruturas de concreto *in loco*, causadas por efeitos como sobrecargas, retração, corrosão de armaduras, entre outros. Onde a geometria das fendas não será retilínea e perpendicular.

Testar os Modelos matemáticos propostos em uma malha de leituras de ultra-som mais ampla, incluindo distâncias maiores, procurando descobrir se grandes distâncias impossibilitam a técnica de ser utilizada.

Procurar avaliar fendas de geometrias variadas tanto inclinadas, quanto tortuosas.

Estudar a influência de barras de aço de maior diâmetro e em maior quantidade.

Buscar associar ao ultra-som outras técnicas não destrutivas, como a análise da perda ou atenuação de sinal, com o auxílio de um osciloscópio com aquisição de dados para computador, para a análise do espectro de freqüências. Há registros de utilizações com sucesso destes equipamentos em conjunto na literatura internacional, como foi citado no Capítulo 2, porém não há registros no Brasil de avaliações deste tipo.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, A. F.; and AL-TAYYIB, A. J., **Effect of hot weather on pulse velocity and modulus of elasticity of concrete**. Materials and Structures, No23, pp 334-340, 1990.

AMON, J. A.; SNELL, L. M.; **The use of pulse velocity techniques to monitor and evaluate epoxy grout repair to concrete**. Concrete Internacional, Dez 1979.

ASTM Test Designation C 579-02, **Standart test method for pulse velocity through concrete**, Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02, West Conshohocken, PA, 2003.

ALMEIDA, I. R., **Emprego do esclerômetro e do ultra-som para efeito da avaliação qualitativa dos concreto de alto desempenho**. Tese para concurso de Professor Titular, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil, 124pp. 1993.

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.

_____ NBR NM 248: **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

BAUER, L. A. F., **Materiais de construção**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 435p., 1987.

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.

BUNGEY, J. H., **The influence of reinforcement on ultrasonic pulse velocity testing**, In Situ Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, pp229-246, 1984.

BUNGEY, J. H., **The testing of concrete in structures**, 2 ed. London, Surrey University Press, 1989.

BRITISH STANDARDS INSTITUTIONS, BS 1881: Part 201, **Guide to the use of non-destructive 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.

CÁNOVAS, M. F., **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988.

CÂMARA, E. **Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizados na grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2006.

CARINO, N. J., **Recent developments in non-destructive testing of concrete**. Advances in Concrete Technology, CANMET, Editor V. M. Malhotra, Canadá, 2ª edição 281 – 337 pp., 1994.

CASTANHEIRA, N. P., **Estatística aplicada a todos os níveis**. 2ª ed. Curitiba: IBPEX, 2003.

CHUNG, H. W., **Effects of embedded steel bars upon ultrasonic testing of concrete**. Magazine of Concrete Research, V 30 No 102, pp 19-25, March 1978.

CHUNG, H. W.; LAW, K. S. **Diagnosis in situ concrete by ultrasonic pulse technique**. Concrete International, October, p 42-49, 1983.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETÓN (CEB), **Durable concrete structure, design guide**. (Bulletin d'Information 166), Paris, 1985.

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.; 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. Porto, p 1015-1022, 2004.

DORNELLES, F. L.; PINTO, R. C. A.; PADARATZ, I. J. **Deteção de falhas internas de concretagem através do uso do ultra-som**, 47º Congresso Brasileiro do Concreto, Pernambuco, IBRACON, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, pr EN-ISO 8047, **Testing concrete – Determination of ultrasonic pulse velocity**. Brusseis, 1994.

EVANGELISTA, A. C. J., **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 211pp., 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.

FIGUEREDO, E. J.; O'REILLY, V.; WANDERLEY, F.; RODRIGUES, G. S. S.; TULA, L., **Orientação para o Diagnóstico. Em: Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto**. Red Rehabilitar editores. São Paulo, p. 107-152. 2003.

FILIPCZYNSKI, L.; PAWLOWSKI, Z.; WEHR, I.; **Ultrasonic methods of testing materials**. (Translation). Butterworths, London, 1966.

GRULLÓN, M.; BARBOSA, P.; MEDEIROS, M.; HELENE, P. R. L., **Correlação entre resistência a compressão e ultra-som: Influência da dosagem e da umidade**. 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, IBRACON, 2004.

HADLICH, A. R.; PINTO, R. C. A.; PADARATZ, I. J., **Análise comparativa do uso do ultra-som em concreto com adição de fibra de aço**. 48º Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, IBRACON, 2006.

HAMASSAKI, L. T., **Utilização do ultra-som em concreto**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 108p, 1986,

HAUWAERT, A. V.; DELANNAY, F.; THIMUS, J., **Cracking behavior of steel fiber reinforced concrete revealed by means of acoustic emission and ultrasonic wave propagation**. ACI Materials Journal, V96 M36 pp 291-296, May-June 1999.

IOSHIMOTO, A. **Incidência de manifestações patológicas em edificações habitacionais**. Tecnologia de Edificações 2, pp 109-112, São Paulo, 1985.

ISSA, A. I.; DEBS, P., **Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete**. Constructing and Building Materials 21, pp 157-163, September 2005.

JONES, R., **Non-destructive testing of concrete**. Cambridge University Press, London, 103pp, 1962.

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.; NÜRNBERGEROVÁ, T.; BABÁL, B.; POPOVICS, J. S. **Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards**. Cement and Concrete Composites, n. 18 p. 357-364, jun. 1996.

LENCASTRE, A. **Manual de hidráulica geral**. Ed. Blücher Ltda, pp 2 - 12, São Paulo, 1972.

LORENZI, A., **Aplicação de testes ultra-sônicos para avaliação de estruturas de concreto utilizando elementos de inteligência artificial.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 153 pp., 2000.

LORENZI, A.; CAETANO, L. F.; DRUNN, M. T.; FILHO, L. C. P. S., **Mapeamento da homogeneidade de estruturas de concreto através da utilização do ensaio de ultrassonografia.** 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Vitória, IBRACON, 2004.

MACHADO, M. D., **Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 238 pp., 2005.

MANUAL TÉCNICO DEGUSSA, Edição 2005.

MEDEIROS, A.; PADARATZ, I. J.; PINTO, R. C. A, **Detecção de fissuras superficiais em elementos estruturais de concreto através do uso do ultra-som.** Anais das XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Campinas, maio 2006.

MEDEIROS, A.; PADARATZ, I. J.; PINTO, R. C. A, **Aplicação do método do ultra-som na detecção de aberturas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções de epóxi em elementos de concreto.** 48º Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, set. 2006.

METHA, P. K.; MOTEIRO, P. J. M., **Concreto – estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, PINI, 573 p, 2000.

MENEGHETTI, L. C., **Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através de ultra-som.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

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.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do concreto.** São Paulo, PINI, 2ª ed. 828 p (tradução da 4ª ed. Em inglês) 1997.

NOGUEIRA, C. L.; WILLIAN, K. J., **Ultrasonic testing of damage in concrete under uniaxial compression**, ACI Materials Journal, V98, M30, pp 265-275, May-June 2001.

NORMA MERCOSUL. NM 58, Concreto Endurecido – **Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica**. Rio de Janeiro, 1996.

OHDAIRA, E.; MASUZAWA, N., **Water content its effect on ultrasound propagation in concrete – the possibility of NDT**. Ultrasonics, 38, pp 565-572, 2000.

ORCHARD, D. F., **The testing of concrete: non-destructive methods of test**. Concrete Technology. Applied Science Publishes Ltd, London Vol 2, 1978.

PADARATZ, I. J., **Apostila de patologia das edificações**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

PHOON, K. K.; WEE, T. H.; LOI, C. S., **Development of statistical quality assurance criterion for concrete using ultrasonic pulse velocity method**, ACI Materials Journal, September – October, pp.568–573. 1999.

PIMENTEL, C. C. D.; NETO, A. A., **Considerações sobre a recuperação de estruturas e suas técnicas**. Colóquio sobre recuperação de estruturas de concreto. IBRACON, São Paulo, 1986.

PINTO, R. C. A.; PADARATZ, I. J.; GARGHETTI, A.; KUMM, T. C., **Aplicação de técnicas não-destrutivas para avaliação da resistência à compressão do concreto**. 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Vitória, IBRACON, 2003.

PINTO, R. C. A.; PADARATZ, I. J.; GARGHETTI, A.; HADLICH, A. R., BERTACCO, L. L.; KUMM, T. C.; PFLEGER, V., **Correlações entre técnicas não-destrutivas para avaliação da resistência à compressão do concreto**. 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, IBRACON, 2004.

PINTO, R. C. A.; PADARATZ, I. J.; GARGHETTI, A.; HADLICH, A. R.; BERTACCO, L. L.; KUMM, T. C.; PFLEGER, V., **Controle de qualidade do concreto em obra utilizando técnicas não-destrutivas**. 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, IBRACON, 2004.

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.

POPOVICS, S., **Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship.** Materials Evaluation, February, 2000.

PUNDIT Manual, CNS Eletronics Ltd., London.,76pp., 1994.

QUESADA, G., **Procedimentos de Reparo. Em: Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto.** Red Rehabilitar editores. São Paulo, p. 281-327. 2003.

QUIXIAN, I.; BUNGUEY, J. H., **Using compression wave ultra-sonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete,** Constructions and Building Materials, V. 10 No4, pp. 237-242, 1996

REPETTE, W. L. **Contribuição à inspeção e à avaliação da segurança de estruturas acabadas de concreto armado.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 169p, 1991.

RILEM, NDT1, **Testing of concrete by the ultrasonic method**, 1972

RINCÓN, O. T.; CARRUYO, C. A.; HELENE, P.; DÍAZ, I. **Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion em estruturas de hormigon armado.** DURAR: Red Temática XV. B Durabilidad de la Armadura – Programa Iberoamericano de Ciência y Tecnologia para el desarrollo, 1998.

ROCHA, C. C., **Injeção de epóxi.** Revista Recuperar nº69 pp 5-10, Janeiro 2006.

RODRIGUES, G. S. S., **Módulo de deformação estático do concreto pelo método ultra-sônico: estudo da correlação e fatores influentes.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 187p, 2003.

ROSELL, J. R. **Herramientas y ensayos para la diagnosis.** In: BELLMUNT, R; CASANOVAS; X; CANOVAS, M. F.; DIAZ, C.; HELENE, P. R. L.; ROSELL, J.; ROSELL, J. R.; VÁZQUEZ, E. **Manual de diagnosis e**

intervención en estructuras de hormigón armado. Barcelona: Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, Capítol 7, p. 71-79, 2000.

SAKATA, Y.; OHTSU, M., **Crack evaluation in concrete members based on ultrasonic spectroscopy.** ACI Materials Journal, V 92, N6 November-December 1995.

SANSALONE, M.; LIN, J.; STRETT, W. B., **Determining the depth of surface-opening cracks using impact generated stress waves and time-of-flight techniques.** ACI Materials Journal, V95, N2, March-April 1998.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D., **FÍSICA Mecânica dos Fluidos - Calor - Movimento Ondulatório.** Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA. Volume 2. 2ª ed. 1016 p. 1993.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D., **FÍSICA Ondas Eletromagnéticas - Óptica - Física Atômica.** Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA. Volume 4. 2ª ed. 1016 p. 1994.

SILVA, M. A. F.; FIGUEIREDO, J. R. F.; CARVALHO, R. C.; FERREIRA, M. A., **Controle de fissuração em vigas de concreto armado de acordo com as recomendações da NBR 6118:2003.** 47º Congresso Brasileiro do Concreto, Pernambuco, IBRACON, 2005.

STAUFFER, J. D; WOODWARD, C. B.; WHITE, K. R., **Nonlinear ultrasonic testing with resonant pulse velocity parameters for early damage in concrete.** ACI Materials Journal, V 102, M14, pp 118-121, March-April 2005.

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.

SUARIS, W.; FERNANDO, V., **Ultrasonic pulse attenuation as a measure of damage growth during cyclic loading of concrete.** ACI Materials Journal, V 84, M20 185-193, December 1987.

TAKAGI, E. M.; ALMEIDA, W. J, **Utilização de tecnologias de injeção para o aumento da durabilidade das estruturas de concreto armado.** 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, IBRACON, 2002.

TOMSETT, H. N., **The practical use of ultrasonic pulse velocity measurements in the assessment of concrete quality.** Magazine of Concrete Research, 32 (110) pp 7-16, Mar. 1980.

VASCONCELOS, A. C.; GIAMMUSSO, S. E. **O misterioso módulo de elasticidade.** 40º Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, IBRACON, 1998.

WHITEHURST, E. A., **Evaluation of concrete properties from sonic tests.** Detroit: American Concrete Institute, 1966.

YAMAN, I. O.; INCI, G.; YESILLER, N. **Ultrasonic pulse velocity in concrete using direct and indirect transmission.** ACI Materials Journal, V 98, N6 November-December, 2001.

ANEXO A

SISTEMAS DE UNIDADES

De acordo com Lencastre (1972), os sistemas de unidades habitualmente utilizados são os do tipo FLT, em que as unidades fundamentais são as de força F, de comprimento L e de tempo T; ou do tipo MLT, em que as unidades fundamentais dão as de massa M, de comprimento L e de tempo T.

Em geral referem-se às diversas grandezas ao **Sistema Métrico (tipo FLT)** cujas unidades fundamentais são: de força, o quilograma-força – *kgf*; de comprimento, o metro – *m*; e de tempo o segundo – *s*. No sistema métrico a massa mede-se em unidade métrica de massa – *u.m.m.*, que se exprime nas unidades fundamentais por $kgf\ m^{-1}\ s^2$.

No **Sistema Internacional – SI** (tipo MLT) as unidades fundamentais são: de força, o Newton – *N*; de comprimento, o metro – *m*; e de tempo o segundo – *s*. No SI se representa massa nas unidades fundamentais por $N\ m^{-1}\ s^2$.

No **Sistema Inglês (tipo FLT)** as unidades fundamentais são: de força, a libra (*pound*) – *lb*; de comprimento, o pé (*foot*) – *ft*, e a polegada (*inch*) – *in*; e de tempo, o segundo (*second*) – *sec*. Neste sistema a unidade de massa é o “*slug*” – $lb\ ft^{-1}\ sec^2$.

Há também referencia ao **Sistema C.G.S (tipo MLT)** cujas unidades fundamentais são: de massa, o grama (massa) – *g*; de comprimento, o centímetro – *cm*; e de tempo o segundo – *s*. Neste sistema a unidade de força é o dine, que se exprime nas unidades fundamentais por $g\ cm\ s^{-2}$.

As dimensões de viscosidade dinâmica (μ) são $FL^{-2}T$. No Sistema C.G.S. a unidade é o *poise*. ($dine\ cm^{-2}\ s$). Geralmente emprega-se o *centipoise* que vale a centésima parte do *poise*. No Sistema Internacional exprime-se a viscosidade dinâmica (μ) em $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$. No Sistema Inglês a viscosidade dinâmica (μ) exprime-se em libras segundo por pé quadrado ($lb\ sec/sq\ ft$).

A conversão de viscosidade dinâmica em CPS para o Sistema Internacional está demonstrada nas Equações A.1 a A.3.

$$dine = \frac{g \cdot cm}{s^2} \quad (A.1)$$

$$poise = \frac{dine \cdot s}{cm^2} = \frac{g}{cm \cdot s} \quad (A.2)$$

$$centipoise = \frac{10^{-2} \cdot g}{cm \cdot s} \xrightarrow{kg} \frac{10^{-2} 10^{-3} \cdot kg}{cm \cdot s} \xrightarrow{kg} \frac{10^{-3} \cdot kg}{m \cdot s} \quad (A.3)$$

ANEXO B

Nos moldes da Série 1, foram obtidas para cada molde, idade e linha de leitura duas velocidades indiretas, baseadas em duas leituras distintas, conforme procedimento descrito em 2.3. As velocidades indiretas utilizadas para a estimativa de profundidade de fendas pelo Modelo 1, nos moldes da Série 1, foram as médias das duas velocidade. A Tabela A.1, mostra como exemplo, para o molde 1f (h=22 cm; $\omega=3$ mm), os tempos de cada leitura, para cada linha, e idade, as velocidades indiretas obtidas pelo gráfico tempo *versus* distância e por fim a média das velocidades, estas últimas apresentadas na Tabela 5.1 e utilizadas na Tabela 5.12. Nesta Série as velocidades foram obtidas com três leituras consecutivas, com incremento de distância de 10 cm.

Tabela A.1 - Tempos de propagação (μ s) para obtenção das velocidades indiretas (m/s), para o molde 1f (h=22,0 cm; $\omega=3$ mm).

Idade	Linha de Leituras	distância (cm)			Vel (m/s)	distância (cm)			Vel (m/s)	Vel média (m/s)
		10	20	30		10	20	30		
5 dias	sup	20,4	46,1	73,9	3736	18,9	45,9	72,2	3752	3744
	inf	18,4	47,0	72,1	3719	17,8	43,9	71,2	3745	3732
7 dias	sup	19,6	47,5	74,3	3656	22,3	49,6	73,6	3893	3775
	inf	20,3	46,7	71,9	3875	20,1	47,3	73,3	3759	3817
9 dias	sup	18,3	42,5	67,3	4016	18,8	43,2	68,8	3858	4040
	inf	17,8	43,9	68,2	3848	19,3	49,8	69,2	4039	3955
12 dias	sup	19,0	47,5	73,6	3661	21,3	47,9	73,6	3824	3743
	inf	21,4	44,1	69,6	4145	19,2	44,0	71,0	3859	4002
14 dias	sup	19,5	46,3	72,7	3759	19,0	46,2	73,0	3704	3732
	inf	19,3	44,5	69,0	4024	18,5	43,8	68,7	3984	4004
16 dias	sup	19,2	44,1	69,7	3974					
	inf	19,7	46,5	72,8	3766					
19 dias	sup	18,6	45,0	70,8	3831	19,0	45,6	69,1	3987	3909
	inf	17,9	45,0	68,7	3931	18,5	44,1	69,7	3906	3919
21 dias	sup	18,3	45,2	71,3	3773	18,1	44,7	70,6	3809	3791
	inf	18,4	44,6	69,4	3921	18,5	44,2	68,9	3968	3945
28 dias	sup	19,6	44,7	72,1	3807	19,2	43,9	71,5	3820	3814
	inf	16,3	41,7	65,7	4047	15,7	41,6	66,2	3960	4004

Para os moldes da Série 2, as velocidades indiretas foram obtidas com quatro leituras consecutivas, com incremento de distância de 5 cm. A partir

desta Série, optou-se por utilizar as velocidades individuais para cada molde e idade, não mais a média de duas velocidades obtidas. Cada um dos tempos de propagação que fornecem estas velocidades é o menor valor obtido no mostrador digital do PUNDIT, de pelo menos duas leituras semelhantes, como foi descrito em 4.7.1. A Tabela A.2 mostra como exemplo, para os moldes 2a1, 2a2, 2a3 e 2a4 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm) os tempos de cada leitura e as velocidades indiretas obtidas para estes tempos *versus* distância, para cada idade, utilizadas na Tabela 5.15.

Tabela A.2 - Tempos de propagação (μ s) para obtenção das velocidades indiretas (m/s), para os moldes 2a1, 2a2, 2a3, 2a4 ($h=7,5$ cm; $\omega=6$ mm).

Idade	molde	distância (cm)				Vel (m/s)
		10	15	20	25	
7 dias	2a1	20,4	33,9	46,1	56,3	4154
	2a2	18,8	33	44,7	57	3952
	2a3	20,9	33,2	45,2	57	4156
	2a4	18,8	32,9	44,7	56,1	4031
14 dias	2a1	20,3	32,8	44,6	56,4	4162
	2a2	20,8	34,6	47,6	56,4	4134
	2a3	20,8	33,2	46,7	57,7	4020
	2a4	21,8	33,4	44,8	56,9	4284
21 dias	2a1	21,2	33,6	45,9	57,3	4144
	2a2	18,6	30,8	47,0	57,3	3754
	2a3	21,2	32,9	45,8	57,7	4084
	2a4	18,7	31,6	42,9	55,8	4076
28 dias	2a1	28,0	38,8	53,2	65,8	3902
	2a2	26,4	38,1	48,9	63,2	4111
	2a3	22,9	33,3	46,2	57,8	4245
	2a4	22,0	35,2	45,5	59,2	4090

Para os moldes da Série 3, as velocidades indiretas foram obtidas com quatro leituras consecutivas, com incremento de distância de 5 cm. Cada um dos tempos de propagação que fornecem estas velocidades é o menor valor obtido no mostrador digital do PUNDIT, de pelo menos duas leituras semelhantes, como foi descrito em 4.7.1. A Tabela A.3 mostra como exemplo, para o molde 3b ($h=10$ cm; $\omega=6$ mm; $\varnothing=12,5$ mm) os tempos de cada leitura e as velocidades indiretas obtidas para estes tempos *versus* distância, para cada idade e distância “y” de afastamento das linhas de leitura ao eixo da barra de aço embutida, utilizadas na Tabela 5.40.

Tabela A.3 - Tempos de propagação (μs) para obtenção das velocidades indiretas (m/s), para o molde 3b ($h=10,0$ cm; $\omega=6$ mm; $\varnothing=12,5$ mm).

Idade	y (cm)	distância (cm)				Vel (m/s)
		10	15	20	25	
14 dias	0	21,5	33,6	44,5	55,4	4437
	2,5	20,8	34,0	46,4	56,1	4207
	5	22,1	34,1	45,5	56,9	4317
	7,5	22,3	35,4	46,4	58,6	4166
	10	23,6	36,3	47,9	60,9	4047
	12,5	21,5	33,6	43,3	58,1	4157
	15	22,5	34,2	47,1	58,9	4094
	17,5	19,9	32,9	45,8	60,6	3700
	20	23,1	34,5	46,2	60,4	4034
	28 dias	0	21,8	31,7	43,8	53,5
2,5		21,8	33,8	45,8	56,5	4303
5		19,8	31,5	44,1	56,3	4094
7,5		21,5	33,5	45,2	57,9	4134
10		20,8	32,6	44,1	57,5	4107
12,5		22,1	32,5	44,0	56,8	4316
15		21,7	33,6	45,8	53,8	4571
17,5		22,0	31,6	45,2	57,5	4145
20		21,8	33,2	47,4	58,1	4050

ANEXO C

Neste anexo encontram-se as especificação do fabricante para a uso das resinas epóxi e espuma de poliuretano utilizadas neste trabalho (MANUAL TÉCNICO DEGUSA, 2005), além das especificações técnicas do aditivo redutor de água, utilizado na confecção dos moldes de concreto utilizados no programa experimental deste trabalho, fornecido pelo fabricante.



The Chemical Company

CONGRESIVE 227 POXY

Adesivo epóxi fluido de uso geral

DESCRIÇÃO DO PRODUTO:

CONGRESIVE 227 POXY é um adesivo epóxi bi-componente, isento de solventes, formulado para usos diversos: como ponte de aderência entre o concreto antigo e uma nova concretagem, na união entre aço e concreto, ancoragem de chumbadores e muitos outros materiais. Devido à sua consistência fluida, é indicado para aplicação em superfícies horizontais e situações onde seja necessária ou possível a aplicação por gravidade .

PROPRIEDADES E BENEFÍCIOS:

- Excelente aderência;
- Resistência à tração sensivelmente superior a do próprio concreto;
- Impermeável;
- Pode ser aplicado com trincha.

CAMPOS DE APLICAÇÃO:

- Juntas de concretagem (juntas frias);
- Reforço de estruturas existentes;
- Reposição de pavimentos;
- Saneamento de estruturas de concreto;
- Proteção de armaduras e restauração de aderência;
- União de soleiras construídas “ in situ ” sobre pavimentos de concreto;
- Ancoragem de aço em concreto em grandes diâmetros;
- Fixação de chumbadores, calhas e guias;
- Colagem de elementos pré-moldados.

MODO DE UTILIZAÇÃO/APLICAÇÃO:

- Substrato apicoado, limpo, preferencialmente seco e isento de contaminações.
- Proceder à mistura do componente A separadamente, e em seguida adicionar o componente B e homogeneizar com misturador de baixa rotação (máximo 300 RPM).
- Pincelar o produto diretamente ao substrato e aguardar o ponto de gel para lançar o concreto novo.
- Jamais adicionar cimento e/ou quaisquer outros agregados sem consulta ao nosso Depto Técnico.
- Aplicar em ambientes ventilados.
- Para uso em ancoragens, verter o material no interior do furo e introduzir a barra de aço. Sugerimos um furo 6mm maior que a bitola do aço

Consumo/rendimento aproximado: 1,75 kg/m²/mm

DADOS TÉCNICOS:

Função principal:	Adesivo epóxi
Base química:	Bisfenol e Poliamidas
Aspecto:	Pasta
Cor da mistura:	Cinza
Viscosidade:	2.750 CPs (23° C)
Densidade (A+B):	1,710 a 1,750 g/cm ³
“Pot Life” a 20° C:	50 a 80 min
Secagem película aplicada (23° C):	2:00 hora
Resistência à compressão 24 horas:	> 45 MPa
Resistência à compressão 3 dias:	> 55 MPa
Resistência à compressão 7 dias:	> 65 MPa
Resistência à compressão 14 dias:	> 85 MPa
Resistência de aderência ao concreto/barra de aço:	11 MPa (14 dias)
Resistência de aderência barra de aço/resina epóxi:	14 MPa (14 dias)
Resistência de aderência concreto/resina epóxi:	1 MPa (7 horas ruptura no concreto)
Resistência de aderência concreto/resina epóxi:	3 MPa (24 horas ruptura no concreto)



The Chemical Company

EMBALAGEM/ ARMAZENAGEM:

Conjunto de 1 kg. Outras embalagens mediante consulta. Deverá ser armazenado á temperatura de 10° C. Temperaturas mais baixas poderão causar a floculação (embolamento do material). Se ocorrer floculação, aquecer o produto à temperatura ambiente, 21 a 23 °C e reconstituir por agitação leve. Não usar ar pressurizado para agitação. Validade de 12 meses a partir da data de fabricação, quando respeitadas as condições de armazenagem.

TRANSPORTE E SEGURANÇA:

Concresive 227 não se enquadra na portaria atual de transportes perigosos. Produto não considerado tóxico, porém impróprio para o consumo humano. Usar meios adequados de combate ao fogo como: névoa de água, dióxido de carbono, espuma, pó químico. Não utilizar jatos de água de alta pressão. A queima produz CO e outros gases tóxicos ou vapores. Altas temperaturas podem causar pressão no interior das embalagens, usar água fria para resfriá-las. Utilizar EPI's adequados: luvas e botas impermeáveis, óculos de segurança química. Evitar contato com a pele e olhos; o contato prolongado com a pele pode causar dermatites. Não beber, comer ou fumar durante o manuseio; lavar as mãos antes de uma pausa ou depois do trabalho. Para maiores detalhes, consultar nossa Ficha de Segurança.



The Chemical Company

CONCRESlVE 90

Resina epóxica de injeção e imprimação

DESCRlÇÃO DO PRODUTO:

Concresive 90 é um sistema epóxico com dois componentes, de baixíssima viscosidade e grande capacidade de penetração capilar, por isso é recomendada sua injeção em trincas, gretas, fissuras e poros.

PROPRIEDADES E BENEFÍCIOS:

Estado Fresco:

Confere as seguintes qualidades especiais:

- Baixíssima viscosidade (em torno de 90 cps);
- Alto poder de penetração;

Estado Endurecido:

• Após endurecimento, é resistente à água, intempéries, águas residuais agressivas, soluções ácidas, básicas e salinas, lubrificantes e óleos minerais.

CAMPOS DE APLICAÇÃO:

- Injeção em gretas, originadas por retrações, e assentamentos diferenciais;
- Injeção de fissuras, gretas e juntas de todo o tipo:
- cortinas e lajes de concreto;
- pavimentos;
- pontes;
- elementos pré-fabricados;
- construção civil em geral.
- Imprimante em substratos para a aderência de tratamentos superficiais.

MODO DE UTILIZAÇÃO/APLICAÇÃO:

A superfície que vai receber o **Concresive 90**, deverá estar seca, livre de pó, partículas soltas, óleo, graxa e etc. Recomenda-se uma limpeza com ar comprimido para eliminar todas as partículas soltas, tanto das fissuras como das áreas circundantes. Se necessário, fazer um tratamento superficial com jatos de areia ou mecanicamente. Obedecendo a proporção recomendada, o endurecedor (componente B) deve ser adicionado à resina (componente A) e misturados até perfeita homogeneização, preferencialmente utilizando um agitador mecânico de baixa rotação (máximo 300 r.p.m.).

Imprimação: O **Concresive 90** deve ser aplicado sobre o substrato formando uma camada delgada, podendo ser aplicado com pulverizador, rodinho, brocha ou pincel. É necessário esclarecer, que se a superfície possui distintos graus de porosidade, **Concresive 90** penetra de forma desigual, aparecendo diferentes tonalidades, que no entanto não influenciam na qualidade da imprimação.

DADOS TÉCNICOS:

Função principal	Adesivo epóxi
Base química	Epóxi
Aspecto	Líquido
Cor da mistura	Âmbar
Viscosidade	100 cps
Densidade (A+B)	1,030 a 1,050 /cm ³
"Gel Time"	40 a 60 min
Secagem ao toque	30 a 50 min

EMBALAGEM/ ARMAZENAGEM:

Conjunto de 1 kg. Outras embalagens mediante consulta.

Deverá ser armazenado à temperatura de 10° C. Temperaturas mais baixas poderão causar a floculação (embolamento do material). Se ocorrer floculação, aquecer o produto à temperatura ambiente, 21 a 23 °C e reconstituir por agitação leve. Não usar ar pressurizado para agitação.

Validade de 12 meses a partir da data de fabricação, quando respeitadas as condições de armazenagem.

TRANSPORTE E SEGURANÇA:

É classificado como transporte perigoso. Utilizar EPI's adequados: luvas e botas impermeáveis, óculos de segurança química. Evitar contato com a pele e olhos; o contato prolongado com a pele pode causar dermatites. Não beber, comer ou fumar durante o manuseio; lavar as mãos antes de uma pausa ou depois do trabalho. Produto corrosivo, não explosivo. Produto não considerado tóxico, porém impróprio para o consumo humano. Para mais detalhes, consultar nossa Ficha de Segurança.

MEYCO® MP 355 1K

Espuma de poliuretano para injeção, mono-componente. Para grauteamento (enchimento) de furos e/ou vazios e rochas fraturadas, assim como para estanqueamento de fluxos de água.

DESCRICAÇÃO DO PRODUTO:

O MEYCO® MP 355 1K é uma resina de poliuretano, mono-componente, livre de solventes.

CAMPOS DE APLICAÇÃO:

O MEYCO® MP 355 1K é recomendado para: Pré-injeção em juntas ou fraturas em rochas / Estabilização de rochas fraturadas e/ou com juntas / Estanqueamento de fluxos de água / Estabilização/consolidação de areias grossas e cascalho / Enchimento de vazios em lençóis d'água.

MODO DE APLICAÇÃO/UTILIZAÇÃO:

Na presença de água

- 1 Adicionar o acelerador ao Meyco MP 355 1K (entre 2-10%, dependendo do tempo de reação requerido - veja tabela 1). Misturar bem.
- 2 Injetar a mistura por meio de bomba de injeção mono-componente. A mistura, em contato com a água presente na rocha, reagirá formando a espuma.

Em condições secas

- 1 Para injeções (impermeabilização): Bombear água em abundância, lavando os furos, umedecendo a área a ser injetada.
 - 2 Adicionar o acelerador ao Meyco MP 355 1K (entre 2-10%, dependendo do tempo de reação requerido - veja tabela 1). Misturar bem.
 - 3 Injetar a mistura por meio de bomba mono-componente
- Caso haja uma injeção num período próximo, pode-se bombear Meyco MP 355 1K sem o acelerador através da bomba para que o resíduo não reaja com a umidade do aparelho. Uma vez que se tenha terminado o processo de injeção, é aconselhável bombear uma certa quantidade de óleo através da bomba, mantendo-a limpa até a próxima execução e evitando a reação de resíduos de produto com a umidade relativa do ar.

DADOS TÉCNICOS:

Meyco MP 355 1K

Cor:	Castanho
Viscosidade (23°C)	300 m.Pas
Densidade (20°C):	1,10 g/ml
Flash point:	180°C
Odor:	Inodoro
Temp. de aplicação	+5°C a +40°C
Expansão da espuma a 23°C a 10%	livre

Acelerador para Meyco MP 355 1K

Dosagem do acelerador	1:25-30
Cor:	Amarelada
Viscosidade (23°C)	70 m.Pas
Densidade (20°C):	1,15 g/ml
Flash point:	110°C
Odor:	Marcante

EMBALAGEM E ARMAZENAGEM:

MEYCO® MP 355 1K: Bombonas de 25 kg e Acelerador p/ MEYCO® MP 355 1K: Frascos de 2,5 kg.

Embalagens originais nas condições mencionadas acima terão uma vida útil de 12 meses.

Manter as embalagens fechadas em local coberto, ventilado, seco, longe das intempéries, fontes de calor, alimentos e bebidas. Evitar contato com ácidos e outros oxidantes. Minimizar a geração de poeira. Armazenar longe do alcance de crianças.

TRANSPORTE E SEGURANÇA:

É classificado como transporte não perigoso.

Produto não inflamável ou explosivo.

Produto não considerado tóxico, porém impróprio para o consumo humano.

O MEYCO® MP 355 1K estanques ao ar, em lugar fresco e seco. Ambos os componentes do MEYCO® MP 355 1K devem ser protegidos contra congelamento. O MEYCO® MP 355 1K é baseado no 4,4' Difenilmetanoisocianato (MDI) ao passo que o acelerador em uma amina.

Após a reação o MEYCO® MP 355 1K não é fisiologicamente nocivo.

Entretanto, o manuseio do produto ser feito com os EPIs padrões: luvas, macacões, protetores para a face e óculos de segurança.

Material não reagido deve ser destinado a locais apropriados para este tipo de resíduo. Melhor no entanto é permitir a reação do produto (resíduos) com água para formar a espuma e, após isto, destinar o produto formado aos locais apropriados.

TABELA 1:

Tempo de reação aproximado com 10% água e 10% de acelerador				
Temperatura Inicial	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C
Início de pega:	120 seg.	60 seg.	25 seg.	10 seg.
Fim de pega:	300 seg.	200 seg.	110 seg.	50 seg.
Fator de expansão	25 %	25%	25%	30%

WRDA™ 38 Aditivo redutor de água *ASTM C494 Tipo A*

DESCRIÇÃO

O aditivo **WRDA™ 38** é uma solução aquosa de compostos orgânicos complexos, que controla a hidratação do cimento Portland.

O **WRDA™ 38** é um líquido de baixa viscosidade pronto para ser utilizado, especialmente preparado para facilitar seu manuseio e dosificação. **WRDA™ 38** não contém cloreto de cálcio.

Seu peso específico é 1,17 kg/litro.

USO

O **WRDA™ 38** produz um concreto mais trabalhável, com uma redução de água de até 10%. O concreto com **WRDA™ 38** produz um concreto com baixo conteúdo de água (redução típica de 8-10%), com maior plasticidade e resistência. É utilizado nas usinas de concreto, indústrias de pré-moldados, pavimentos de concreto, concretos de densidades normal e leve e em concretagem “in locu”. Possui maior resistência, menor permeabilidade e maior durabilidade. É utilizado nas usinas de concreto, indústrias de pré-moldados, pavimentos de concreto, concretos de densidades normal e leve e em concretagem “in locu”.

VANTAGENS

O uso do **WRDA 38™** produz um concreto mais plástico, muito trabalhável, mais fácil de ser lançado, mais fácil de bombear e com

melhor acabamento do que aquele obtido com outros aditivos redutores de água. No estado endurecido o concreto com o **WRDA 38™** apresenta aumento de resistências a compressão e a flexão, em qualquer idade, superiores aos outros plastificantes do tipo normal.

WRDA 38™, produz minimizado efeito no tempo de pega inicial (15~20 minutos a 25°C), o que não ocorre com outros aditivos redutores de água *livres* de cloretos disponíveis no mercado, os quais podem produzir significativo grau de retardo da pega inicial.

O concreto com **WRDA 38™** apresenta notáveis melhoras em sua superfície com menor exsudação durante sua colocação, reduzindo a aproximadamente 25% o tempo de trabalho das moto-acabadoras (bambolê).

CONTROLE DE HIDRATAÇÃO

O **WRDA 38™** - Hydration Control, otimiza o grau de hidratação do cimento no concreto com ganhos de resistência sem alterações importantes do tempo de início de pega.

O **WRDA 38™** atua também como agente dispersante que minimiza a atração natural entre as partículas de cimento na água, isto é, reduz a tendência ao aglutinamento das partículas do cimento formando uma mistura mais trabalhável, facilitando seu lançamento e um melhor acabamento final, com menor quantidade de água. A combinação da redução de água com a hidratação

controlada melhora a taxa de formação do gel que une os agregados do concreto; este controle sobre o gel somado à retenção de água e à coesão interna da mistura se traduzem redução da exsudação e da segregação, enquanto aumenta e melhora a trabalhabilidade do concreto.

DOSIFICAÇÃO

Excelentes resultados serão obtidos com dosificações entre 0,20% a 0,40%, com relação ao peso de cimento. Em alguns casos ligeiras alterações na dosificação serão necessárias devido as características dos cimentos e dos demais componentes do concreto e/ou projeto.

COMPATIBILIDADE COM OUTROS ADITIVOS

WRDA 38™ é compatível com todos os incorporadores de ar tais como **DARAVAIR™**. Devido a sinergia dos efeitos do **WRDA 38™** a quantidade de incorporador de ar poderá ser reduzida entre 25% e 50%. A combinação dos efeitos de incorporadores de ar e redutores de água poderá gerar uma redução da água de mistura de até 20%.

CADA ADITIVO DEVERÁ SER ADICIONADO SEPARADAMENTE AO CONCRETO.

FORNECIMENTO

O **WRDA 38™** está disponível em tambores com 230 kg ou a granel. Este produto não contém ingredientes inflamáveis.

ASSISTÊNCIA TÉCNICA

O departamento técnico da GRACE Construction Products está a disposição de nossos clientes para