

Fabio Caon de Souza

**AVALIAÇÃO DO PREENCHIMENTO COM SISTEMA EPÓXI
DE FENDAS INDUZIDAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
PELA ANÁLISE DO SINAL ULTRASSÔNICO**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil -
PPGEC da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Civil
Orientador: Prof. Roberto Caldas de
Andrade Pinto, Ph.D.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Souza, Fabio Caon de
Avaliação do preenchimento com sistema epóxi de
fendas induzidas em estruturas de concreto pela
análise do sinal ultrassônico / Fabio Caon de Souza
; orientador, Roberto Caldas de Andrade Pinto, 2017.
195 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, , Programa de Pós-Graduação em ,
Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. . 2. Ensaio não-destrutivo. 3. Ultrassom.
4. Reparo. 5. Epóxi. I. Pinto, Roberto Caldas de
Andrade. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em . III. Título.

Fabio Caon de Souza

**AValiação DO PREENCHIMENTO COM SISTEMA EPÓXI
DE FENDAS INDUZIDAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
PELA ANÁLISE DO SINAL ULTRASSÔNICO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para 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

Florianópolis, 20 de outubro de 2017.

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina – PPGEC/UFSC

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do PPGEC/UFSC

Banca Examinadora:

Prof. Gibson Rocha Meira, Dr. (Videoconferência)
Universidade Federal da Paraíba - PPGECA/UFPB

Prof. Ivo José Padaratz, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina - ECV/UFSC

Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina – PPGEC/UFSC

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e esperança de sempre seguir em frente.

Aos meus pais, Lourival e Rosa (in memorian) pelos ensinamentos, apoio e exemplos de caráter durante a minha vida. Mãe, sei que você vive em mim, sinto sua presença mesmo na sua ausência e levarei sua alegria para sempre em meu coração.

Ao Vô Caon (in memorian), pelos exemplos de organização, dedicação e limpeza em cada atividade que fazia que certamente foram excepcionais para o sucesso do programa experimental desta pesquisa.

Aos meus irmãos, Marcelo e Elaine, pelo incentivo constante e carinho mútuo nesse ano tão difícil que estamos passando com nossas perdas.

À minha companheira Alice Trentini, por todo apoio, incentivo e compreensão nesta etapa, pelos momentos alegres e por estar sempre ao meu lado, transmitindo força e coragem. Agradecimento especial pela ajuda na moldagem dos prismas e com ideias engenhosas para o programa experimental.

Ao Professor Roberto Pinto, pela orientação e auxílio no desenvolvimento desta pesquisa com paciência e dedicação mesmo no momento em que esteve afastado por problemas de saúde. Obrigado por me fazer enxergar novos caminhos de análise, sem perder o foco, quando a imensidade de dados dificultava a visualização dos resultados.

Aos Professores Ivo Padaratz, Wellington Repette e Gibson Meira pelas valiosas contribuições realizadas na avaliação deste trabalho.

Aos colegas de mestrado, professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

À faxineira Carmen pela companhia nos 3 longos meses de ensaio com o ultrassom.

À empresa Pedrita pelo fornecimento dos agregados graúdos para moldagem dos prismas.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro.

RESUMO

SOUZA, F.C. **Avaliação do preenchimento com sistema epóxi de fendas induzidas em estruturas de concreto pela análise do sinal ultrassônico**. 195 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

Os ensaios não destrutivos (ENDs) são importantes ferramentas para auxiliar no entendimento do mecanismo de ocorrência de manifestações patológicas e oferecem suporte na tomada de decisões para o diagnóstico de uma estrutura danificada assim como na verificação da qualidade de reparos. A técnica de injeção de fissura com o sistema epóxi já está consagrada nos serviços de reabilitação de edificações e permite restaurar o monolitismo do concreto. O procedimento usual para a comprovação da efetividade da injeção é realizado pela retirada de testemunhos, sendo esse um ensaio destrutivo que nem sempre é capaz de analisar a estrutura por completo. Em um estudo realizado pelo GPEND (Grupo de Pesquisa em Ensaio Não Destrutivos) da UFSC, verificou-se que a velocidade de propagação da primeira onda do sinal ultrassônico não permite a detecção do pleno preenchimento de uma injeção com o sistema epóxi uma vez que tal parâmetro considera a chegada da primeira onda a qual atravessa o caminho com epóxi ao invés de contornar a fenda semipreenchida. A proposta deste trabalho foi verificar se os parâmetros relacionados à energia do sinal ultrassônico (energia total, energia acumulada, janelas de tempo e amplitude máxima) com o modo de leitura indireto são sensíveis às diferentes proporções de aplicação de resina a fim de avaliar se o preenchimento foi parcial ou completo. Para as análises foi desenvolvido um programa experimental com prismas de concreto contendo diversas profundidades de fendas superficiais induzidas que foram preenchidas com epóxi em diferentes frações da profundidade a fim de averiguar as alterações da energia do sinal. Como variáveis do experimento teve-se: 6 profundidades da fenda, 3 resinas com diferentes valores de impedância acústica, 5 posições de leitura (distância a fenda), 2 frequências de transmissão do transdutor (54 kHz e 200 kHz); 2 pressões de acoplamento para o transdutor de 54 kHz. Pôde-se observar que para o transdutor de 54 kHz os parâmetros da energia total e amplitude máxima foram sensíveis aos diferentes níveis de preenchimento, e o aumento da pressão aumentou o número de posições de leitura sensíveis à detecção; já para o transdutor de 200 kHz, além do parâmetro de amplitude, a energia acumulada e as janelas de tempo também foram sensíveis à detecção de

preenchimentos parciais de epóxi. Com relação ao tipo de resina, observou-se que as resinas com maior coeficiente de transmissão foram melhores detectadas pelos parâmetros de energia e amplitude, já para as janelas de tempo, a melhor detecção foi para resinas de maior coeficiente de reflexão. Por fim, analisou-se se a leitura realizada no concreto íntegro poderia ser utilizada como referência para um sinal com a fenda plenamente preenchida e constatou-se que a leitura no concreto não foi adequada, possivelmente devido ao uso de uma superfície diferente da região utilizada para a obtenção do sinal com a fenda preenchida.

Palavras-chave: Ensaios não-destrutivos. Ultrassom. Energia do sinal ultrassônico. Reparo. Injeção de fissuras. Epóxi.

ABSTRACT

SOUZA, F.C. **Evaluation of the epoxy filling of induced slits in concrete structures by the analysis of the ultrasonic signal.** 195 p. Dissertation (Masters in structures) - Program of Postgraduate in Civil Engineering - PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianopolis, 2017.

The nondestructive testing (NDT) are important tools to assist in the understanding of the mechanism of occurrence of pathological manifestations and offer support for the decision making for the diagnosis of a damaged structure and the inspection of the repair quality. The crack injection technique using epoxy systems is consecrated in the services of rehabilitation of edifications and allows to restore the monolithism of the concrete. The usual technique to evaluate the injection process is done by the removal of cores, which is a destructive testing that is not always able to analyse the structure completely. In a research done by the research group of nondestructive testing at Federal University of Santa Catarina, it was verified that the ultrasonic pulse velocity is not a good parameter to detect the full filling of an injection with epoxy resins because the parameter considers the arrival of the first wave which crosses the path with epoxy instead the semi-filled slit. The proposal of this research was verifying if the parameters related to the ultrasonic signal energy (total and accumulated energy, time windows, and maximum amplitude) using the indirect measure are sensible to the different proportions of the applied epoxy resins in order to evaluate the full filling. For the analysis it was developed an experimental program with concrete prisms with induced superficial slits with different depth that was filled with epoxy in different depth fractions in order to investigate the changes of the signal's energy. The experiment variables were: 6 slit depths, 3 resins with different dynamic viscosity values, 5 reading positions (distance to slit), 2 transducer frequencies (54 kHz and 200 kHz); 2 coupling pressure for the 54 kHz transducer. It was observed that for the 54 kHz transducer the parameters of the total energy and the maximum amplitude were sensitive to the different filling levels, and the increase in the pressure increased the number of positions sensitive to the detection; for the 200 kHz transducer, besides the parameter of amplitude, the accumulated energy and the time windows were also sensitive to the detection of partial fillings of epoxy. Regarding the type of epoxy, it was observed that the resins with the highest transmission coefficient were better detected by the energy and amplitude parameters, and for the accumulated energy the

best detection was using resins with high reflexion coefficient. Finally, it was analysed whether the measure performed on the intact concrete could be used as a reference for a full filled slit signal and it verified that the reading on the concrete were not adequate, possibly due to the use of a surface different from the region used for the signal with the slit filled

Keywords: Nondestructive testing. Ultrasound. Ultrasonic signal energy. Repair. Crack injection. Epoxy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Causas comuns de geração de fissuras em estruturas de concreto.....	9
Figura 2.2 - Aplicação do sistema epóxi de forma gravitacional.....	13
Figura 2.3 - Dimensões do corpo-de-prova para o ensaio de fadiga do epóxi.....	15
Figura 2.4 - Caminho percorrido pelo pulso ultrassônico em uma viga com uma fenda parcialmente preenchida com epóxi.....	17
Figura 2.5 - Onda longitudinal (compressão) ou onda P.....	21
Figura 2.6 - Onda transversal (cisalhamento) ou onda S.....	21
Figura 2.7 - Onda transversal (Rayleigh).....	22
Figura 2.8 - Reflexão e transmissão acústica de uma onda incidente. ..	23
Figura 2.9 - Esquema de funcionamento do ultrassom.....	25
Figura 2.10 - Calibração do aparelho de ultrassom com o material de referência.....	26
Figura 2.11 - Acoplamento do transdutor no material de ensaio.....	27
Figura 2.12 - Configuração para leituras de ultrassom – (a) direta; (b) semidireta; (c) indireta.....	28
Figura 2.13 - Gráfico para o cálculo da velocidade indireta.....	29
Figura 2.14 - Posicionamento dos transdutores conforme a direção de lançamento do concreto.....	30
Figura 2.15 – Posicionamento dos transdutores para a detecção da fenda e obtenção da velocidade do ultrassom com o modo de leitura indireto.....	32
Figura 2.16 - Posicionamento dos transdutores para a detecção da fenda.....	33
Figura 2.17 - Medida da profundidade de fissura - Bungey et al. (2006).....	33
Figura 2.18 - Medida da profundidade de fissura - BS 1881 (1986).....	35
Figura 2.19 - Arranjo de transdutores para detecção de fissuras oblíquas.....	36
Figura 2.20 - Medida da profundidade de fissura – Método “A”.....	37
Figura 2.21- Apresentação da melhor reta com base nos valores calculados pelo ensaio ($X_i^2 \times T_i^2 / 4$) utilizando o Método A.....	37
Figura 2.22 - Medida da profundidade da Fissura – Método “B”.....	38
Figura 2.23 - Trajeto da onda para uma fissura aberta (à esq.) e para uma fissura parcialmente fechada (à dir.).....	39
Figura 2.24 - Destaque da primeira onda do sinal ultrassônico em uma amostra de concreto utilizando o arranjo indireto.....	40

Figura 2.25 - Energia Acumulada para uma amostra sã (azul) e fissurada (vermelho).....	43
Figura 2.26 - Energia Acumulada para diferentes percentuais de vazios em argamassas.	43
Figura 2.27 - Energia Acumulada para diferentes níveis de carga em uma viga de concreto armado.	44
Figura 2.28: Indicação do parâmetro TC obtido no sinal ultrassônico em uma amostra de concreto utilizando o arranjo indireto.	46
Figura 2.29 - Amplitude máxima de um sinal ultrassônico obtido pelo arranjo indireto em uma amostra de concreto armado.	46
Figura 2.30 - Sinal truncado devido às elevadas amplificações de sinal.	47
Figura 2.31 - Representação esquemático do arranjo dos sensores.	48
Figura 2.32 - Correlação entre a distância e o tempo de chegada da onda Rayleigh para um concreto íntegro.	48
Figura 2.33 - Correlação entre a distância e o tempo de chegada da onda Rayleigh para um concreto antes do reparo (à esquerda) e após o reparo (à direita).....	49
Figura 2.34 - Tomogramas a) antes e b) após a recuperação da fissura. As setas indicam a posição real de aberturas da fissura.	50
Figura 2.35 - Amplitude x Profundidade utilizando transdutores de frequência de: (a) 115 kHz e (b) 50 kHz.....	51
Figura 2.36 - Formato do sinal para diferentes condições do concreto.	52
Figura 2.37 - Representação de um preenchimento parcial.	52
Figura 2.38 - Amplitude x percentual de preenchimento com epóxi em diferentes profundidades.....	53
Figura 2.39 - Velocidade de propagação do ultrassom x tempo de cura da resina para 3 temperaturas.....	54
Figura 2.40 - Amplitude x tempo de cura da resina para 3 temperaturas.	55
Figura 2.41 - Configuração do ensaio para leituras em uma superfície (à esquerda) e foto do experimento em laboratório (à direita).	56
Figura 2.42: (a) e (c) imagem do campo do sinal transmitido com o uso da simulação numérica e em (b) e (d) o respectivo formato do sinal....	57
Figura 2.43 - Vistas do posicionamento dos transdutores e das capsulas de vidro.	59
Figura 2.44 – Alteração da velocidade de propagação para cada caso estudado antes e após o carregamento e após o reparo.	60
Figura 2.45 - Relação entre a amplitude, a velocidade de propagação, a resistência e a rigidez da peça estrutural	61

Figura 2.46 - Comparação entre os parâmetros sensíveis nas placas de concreto são e fissurado.	62
Figura 2.47 - Comparação entre os parâmetros para a viga de concreto armado sob esforços de flexão.	63
Figura 2.48 – Curvas de energia total em função do carregamento.	64
Figura 2.49 Comparativo das janelas de tempo para diferentes cargas.	64
Figura 2.50 – Redução da velocidade de propagação do sinal (à esq.) e da amplitude máxima (à dir.) em função da temperatura.	65
Figura 2.51 – Redução da energia (à esq.) e aumento do tempo para acúmulo de um percentual de energia (à dir.) em função da temperatura.	65
Figura 2.52 – Energia acumulada em corpos-de-prova de concreto para as diferentes temperaturas.	66
Figura 3.1 – Fluxograma com as etapas da pesquisa.	71
Figura 3.2 - Procedimento para indução das fendas superficiais nos prismas de concreto.	72
Figura 3.3 - Aparelho PUNDIT Lab+ com os transdutores de 54 kHz e 200 kHz.	75
Figura 3.4 - Brita 0 (à esquerda) e Brita 1 (à direita).	76
Figura 3.5 – Agregado miúdo.	77
Figura 3.6 – Amostra do Epóxi A, B e C (5 x 10 cm) utilizadas para a obtenção da velocidade de propagação com o ultrassom.	78
Figura 3.7 - Concreto fresco após o lançamento.	79
Figura 3.8 - Concreto fresco após o lançamento.	79
Figura 3.9 - Gabarito de madeira para utilização dos transdutores de 54 kHz.	81
Figura 3.10 - Gabarito de madeira para utilização dos transdutores de 200 kHz.	82
Figura 3.11 - A esquerda o peso para pressão de 0,028 N/mm ² e a direita o peso acrescentado para a pressão de 0,047 N/mm ²	82
Figura 3.12 - A esquerda o peso utilizado para pressão no transdutor de 200 kHz e a direita o suporte de madeira para efetuar a transferência da carga.	83
Figura 3.13 - Esquema de posicionamento e aplicação pressão dos transdutores de 54 kHz (pressão de 0,028 N/mm ²) – posição de leitura 250 mm.	84
Figura 3.14 - Esquema de posicionamento e aplicação da pressão dos transdutores de 54 kHz (pressão de 0,047 N/mm ²) - posição de leitura 250 mm.	84

Figura 3.15 - Esquema de posicionamento e aplicação da pressão dos transdutores de 200 kHz (pressão de 0,117 N/mm ²) – posição de leitura 150 mm.	84
Figura 3.16 – Posicionamento dos transdutores para a detecção da fenda.	86
Figura 3.17 - Vista e perspectiva da ordem de aplicação do epóxi e modo de leitura com o ultrassom.	87
Figura 3.18 - Limpeza da fenda com ar comprimido e selagem das bordas com nata de cimento.	88
Figura 3.19 - Segunda e terceira aplicação do epóxi.....	88
Figura 3.20 - Camadas 2 e 3 de poliestireno expandido na fenda de abertura de 20 mm (à esq.), camada 3 de poliestireno expandido após a primeira aplicação do epóxi (centro.) e selagem das bordas para primeira aplicação da resina na fenda de 3 mm (à dir.).....	89
Figura 3.21 - Primeira aplicação do epóxi A (à esq.) e do epóxi B (à dir.).	89
Figura 3.22 - Retirada da primeira camada de papel plastificado da fenda de 3 mm (à esq.). Segunda aplicação do epóxi A (centro) e fenda após a segunda aplicação (à dir.).....	89
Figura 3.23 - Segunda aplicação do epóxi C na fenda de 20 mm (à esq.) e terceira aplicação do epóxi A (à dir.).....	90
Figura 3.24 – Rotação do prisma de análise para efetuar as leituras na superfície de referência (concreto íntegro).	90
Figura 3.25 - Padrão de ensaios adotado na pesquisa.	91
Figura 4.1 - Gráfico utilizada para detecção de fenda segundo a BS 1881 (1986).....	94
Figura 4.2 - Sinal ultrassônico para o prisma S1-150-3-B, Posição 100 mm, Ganho 1X, Transdutor 54 kHz (0,028 N/mm ²).	97
Figura 4.3 - Sinal ultrassônico para o prisma S1-150-3-B, Posição 100 mm, Ganho 1X, Transdutor 54 kHz (0,047 N/mm ²).	97
Figura 4.4 - Sinal ultrassônico para o prisma S1-150-3-B, Posição 150 mm, Ganho 50X, Transdutor 200 kHz (0,117 N/mm ²).	98
Figura 4.5 - Energia Acumulada para o prisma S1-75-3-B, posição 200 mm, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm ² .102	
Figura 4.6 - Energia Acumulada para o prisma S1-75-3-B, posição 200 mm, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,047 N/mm ² .102	
Figura 4.7: Energia Acumulada para o prisma S1-75-3-B, posição 200 mm, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm ²	103
Figura 5.1 - Sobreposição da energia acumulada de 14 sinais obtidos em uma mesma posição de leitura.	110

Figura 5.2 - Comparativo da incidência de posições de leitura sensíveis à detecção parcial para cada parâmetro nos prismas da série S1-3-A. ...	112
Figura 5.3 - Comparativo da incidência de posições de leitura sensíveis à detecção parcial para cada parâmetro nos prismas da série S1-3-B. ...	113
Figura 5.4 - Comparativo da incidência de posições de leitura sensíveis à detecção parcial para parâmetro nos prismas da série S2-20-C.	113
Figura 5.5 - Percentual de ocorrência das posições de leitura sensíveis para as pressões de 0,028 N/mm ² e 0,047 N/mm ² (54 kHz) - parâmetro: amplitude máxima.	117
Figura 5.6 - Percentual de ocorrência das posições de leitura sensíveis para as pressões de 0,028 N/mm ² e 0,047 N/mm ² (54 kHz) - parâmetro: energia total.	117
Figura 5.7 - Percentual de ocorrência das posições de leitura para o transdutor de 200 kHz - parâmetro: amplitude máxima.	118
Figura 5.8 - Energia Acumulada do prisma S1-25-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 50% / 100% (posição de leitura: 100 mm).	119
Figura 5.9 - Energia Acumulada do prisma S1-50-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 100 mm).	119
Figura 5.10 - Energia Acumulada do prisma S1-100-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 100 mm).	120
Figura 5.11 - Energia Acumulada do prisma S1-150-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 100 mm).	120
Figura 5.12 - Energia Acumulada do prisma S1-220-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 100 mm).	121
Figura 5.13 - Energia Acumulada do prisma S1-100-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 200 mm).	121
Figura 5.14 - Energia Acumulada do prisma S1-150-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 200 mm).	122
Figura 5.15 - Energia Acumulada do prisma S1-220-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 200 mm).	122
Figura 5.16 - Redução do parâmetro TC para cada percentual de preenchimento - S1-50-3-A.	123

Figura 5.17 – Redução do parâmetro TC para cada percentual de preenchimento – S1-75-3-A.....	123
Figura 5.18 – Redução do parâmetro TC para cada percentual de preenchimento – S1-100-3-A.....	123
Figura 5.19 – Redução do parâmetro TC para cada percentual de preenchimento – S1-220-3-A.....	123
Figura 5.20 - Percentual de ocorrência das posições de leitura sensíveis para as pressões de 0,028 N/mm ² e 0,047 N/mm ² (54 kHz) - parâmetro: amplitude máxima.....	128
Figura 5.21 - Percentual de ocorrência das posições de leitura sensíveis para as pressões de 0,028 N/mm ² e 0,047 N/mm ² (54 kHz) - parâmetro: Energia total.....	128
Figura 5.22 - Percentual de ocorrência das posições de leitura para o transdutor de 200 kHz - parâmetro: amplitude máxima e energia total.	129
Figura 5.23 - Energia Acumulada do prisma S1-25-3-B (posição de leitura: 200 mm).....	129
Figura 5.24 - Energia Acumulada do prisma S1-75-3-B (posição de leitura: 200 mm).....	130
Figura 5.25 - Energia Acumulada do prisma S1-150-3-B (posição de leitura: 200 mm).....	130
Figura 5.26 - Energia Acumulada do prisma S1-220-3-B (posição de leitura: 200 mm).....	131
Figura 5.27 – Aumento do percentual de posições sensíveis para os diferentes tipos de epóxi (54 kHz) – parâmetro da amplitude máxima (à esq.) e energia total (à dir.).	135
Figura 5.28 - Redução do percentual de posições sensíveis para os diferentes tipos de epóxi (200 kHz) – parâmetros T50 e T75.	136

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Informações importantes sobre as fissuras para um diagnóstico.	8
Quadro 2.2: Resumo dos estudos realizados.	67
Quadro 3.1 - Resumo das variáveis analisadas para as análises.	73
Quadro 3.2: Características dos prismas utilizados na pesquisa.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Impedância acústica de diferentes materiais.....	22
Tabela 2.2 - Acréscimo do tempo para acumular um determinado percentual de energia em função do nível de carga.....	45
Tabela 3.1 - Características dos produtos utilizados	78
Tabela 3.2 - Composição por metro cúbico de concreto.	79
Tabela 3.3 - Valores de resistência e da velocidade de propagação nos corpos-de-prova de cada betonada.	80
Tabela 3.4 - Pressões exercidas nos transdutores.....	83
Tabela 4.1 - Valores de velocidade de propagação indireta para cada prisma.....	94
Tabela 4.2 - Estimativa da profundidade das fendas para os diferentes métodos.	95
Tabela 4.3 - Tempo de propagação para o prisma S1-50-3-A, Transdutor 54 kHz (0,028 N/mm ²).	99
Tabela 4.4 - Valores de energia total para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm ² e 0,047 N/mm ² . ..	99
Tabela 4.5 - Valores de energia total para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm ²	100
Tabela 4.6 - Valores de amplitude máxima para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm ² e 0,047 N/mm ²	100
Tabela 4.7 - Valores de amplitude máxima para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm ²	101
Tabela 4.8 - Valores do T25 para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm ² e 0,047 N/mm ²	104
Tabela 4.9 - Valores do T25 para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm ²	104
Tabela 4.10 - Valores do T50 para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm ² e 0,047 N/mm ²	104
Tabela 4.11 - Valores do T50 para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm ²	105
Tabela 4.12 - Valores do T75 para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm ² e 0,047 N/mm ²	105
Tabela 4.13 - Valores do T75 para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm ²	105
Tabela 4.14 - Valores do TC para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm ² e 0,047 N/mm ²	106
Tabela 4.15 - Valores do TC para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm ²	106

Tabela 5.1 - Variação nos valores dos parâmetros de 14 sinais obtidos em uma mesma posição de leitura - Prisma S1-75-3-B - 200 kHz (0,117 N/mm ²);.....	109
Tabela 5.2 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.....	115
Tabela 5.3 - Posições de leitura observadas para o parâmetro a energia total.	115
Tabela 5.4 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.....	115
Tabela 5.5 - Posições de leitura observadas para o parâmetro a T50..	116
Tabela 5.6 - Posições de leitura observadas para o parâmetro a T75..	116
Tabela 5.7 - Posições de leitura observadas para o parâmetro a TC...	116
Tabela 5.8 - Resumo dos parâmetros e posições sensíveis para cada modo de leitura (S1-3-A).	124
Tabela 5.9 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.....	125
Tabela 5.10 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da energia total.	125
Tabela 5.11 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.....	125
Tabela 5.12 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da energia total.	126
Tabela 5.13 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.....	126
Tabela 5.14 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da Energia Total.	126
Tabela 5.15 - Posições de leitura observadas para o parâmetro T25. .	127
Tabela 5.16 - Posições de leitura observadas para o parâmetro T50. .	127
Tabela 5.17 - Posições de leitura observadas para o parâmetro T75. .	127
Tabela 5.18 - Resumo dos parâmetros e posições sensíveis para cada modo de leitura (S1-3-B).	131
Tabela 5.19 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.....	132
Tabela 5.20 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da energia total.	132
Tabela 5.21 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.....	132
Tabela 5.22 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da energia total.	132
Tabela 5.23 - Resumo dos parâmetros e posições sensíveis para cada modo de leitura (S2-20-C).	133

Tabela 5.24 - Valores de densidade e velocidade longitudinal de cada resina para obtenção da impedância acústica.	134
Tabela 5.25 - Coeficiente de reflexão e coeficiente de transmissão de cada resina.	135
Tabela 5.26 - Percentual de variação ente os valores obtidos para os prismas S1-25-3-A e S1-25-3-B, antes do preenchimento das fendas.	137
Tabela 5.27 - Percentual de variação ente os valores obtidos para os prismas S1-50-3-A e S1-50-3-B, antes do preenchimento das fendas.	137
Tabela 5.28 - Percentual de variação ente os valores obtidos para os prismas S1-75-3-A e S1-75-3-B, antes do preenchimento das fendas.	138
Tabela 5.29 - Percentual de variação ente os valores obtidos para os prismas S1-150-3-A e S1-150-3-B, antes do preenchimento das fendas.	138
Tabela 5.30 - Percentual de variação ente os valores obtidos para os prismas S1-220-3-A e S1-220-3-B, antes do preenchimento das fendas.	138
Tabela 5.31 – Comparação os valores de energia total dos sinais obtidos com a fenda completamente preenchida e a região de concreto íntegro.	140

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	OBJETIVOS	4
1.1.1.	Objetivo geral	4
1.1.2.	Objetivos específicos	5
1.2.	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	5
1.3.	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	5
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1.	TRATAMENTO DE FISSURAS	7
2.1.1.	Tipos de fissuras	8
2.1.2.	Reparo de fissuras com sistema epóxi	9
2.1.2.1.	Técnica de injeção de fissuras	11
2.1.3.	Ensaio experimental com uso de epóxi para recuperação estrutural	13
2.2.	ULTRASSOM NO CONCRETO	18
2.2.1.	Onda, Frequência, Velocidade e Comprimento de Onda	18
2.2.1.1.	Onda mecânica	18
2.2.1.2.	Frequência	18
2.2.1.3.	Velocidade de propagação	19
2.2.1.4.	Comprimento de onda	19
2.2.2.	Relação entre Velocidade, Comprimento de onda e Frequência	19
2.2.3.	Tipos de ondas	20
2.2.3.1.	Ondas Longitudinais ou de Compressão	20
2.2.3.2.	Ondas Transversais ou de Cisalhamento	21
2.2.3.3.	Ondas Superficiais ou de Rayleigh	21
2.2.4.	Impedância acústica	22
2.2.5.	Ensaio de ultrassom	24
2.2.6.	Equipamento de ultrassom	25
2.2.7.	Fatores intervenientes	30

2.2.8. Aplicações	30
2.2.8.1. Medição e detecção de fissuras	31
2.2.9. Análise do formato do sinal propagado pelo ultrassom para avaliação de danos.....	39
2.2.9.1. Tempo de propagação	40
2.2.9.2. Energia do Sinal	41
2.2.9.3. Energia acumulada.....	42
2.2.9.4. Janelas de tempo	44
2.2.9.5. Amplitude máxima	46
2.2.10. Estudos com uso dos parâmetros do sinal ultrassônico para avaliação de fissuras, danos e técnicas de reparo.....	47
2.2.10.1. Aggelis e Shiotani (2007)	47
2.2.10.2. Aggelis, Shiotani e Polyzos (2009).....	50
2.2.10.3. Aggelis e Paipetis (2012)	53
2.2.10.4. Aggelis, Leonidou e Matikas (2012).....	56
2.2.10.5. Tsangouri et al. (2015).....	58
2.2.10.6. Carelli (2014).....	61
2.2.10.7. Hofmann (2015).....	63
2.2.10.8. Viana (2017)	65
2.2.11. Considerações finais sobre o capítulo.....	66
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	71
3.1. GEOMETRIA DOS PRISMAS E FENDAS	72
3.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	74
3.2.1. Equipamento de Ultrassom.....	74
3.2.2. Materiais: composição do concreto	76
3.2.2.1. Cimento.....	76
3.2.2.2. Agregados Graúdos.....	76
3.2.2.3. Agregados miúdos	76
3.2.2.4. Água.....	77
3.2.3. Materiais: Sistema epóxi	77

3.3.	PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	78
3.4.	ENSAIOS COM ULTRASSOM.....	81
3.4.1.	Minimização do efeito de variáveis.....	81
3.4.1.1.	Fixação da posição do transdutor	81
3.4.1.2.	Pressão fixa aplicada pelo transdutor	82
3.4.1.3.	Absorção de gel acoplante pelo concreto	85
3.4.1.4.	Ganho de sinal.....	85
3.4.2.	Preenchimento das fendas	86
3.4.3.	Leituras de referência	90
3.4.4.	Padrão de ensaio adotado na pesquisa	90
3.4.5.	Processamento dos dados e parâmetros analisados	91
4.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	93
4.1.	ESTUDO PRELIMINAR: DETECÇÃO DA FENDA E VELOCIDADE OBTIDA COM O MODO DE LEITURA INDIRETO 93	
4.2.	ESTUDO PRELIMINAR: ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DAS FENDAS	95
4.3.	PRENCHIMENTO DAS FENDAS COM EPÓXI	96
4.3.1.	Formato do sinal.....	96
4.3.2.	Tempo de propagação.....	98
4.3.3.	Energia Total	99
4.3.4.	Amplitude Máxima	100
4.3.5.	Energia Acumulada	101
4.3.6.	Janelas de tempo: T25, T50, T75 e TC.....	103
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	107
5.1.1.	Análises preliminares.....	107
5.1.1.1.	Detecção das fendas e velocidade indireta	107
5.1.1.2.	Estimativa da profundidade das fendas	107
5.1.1.3.	Tempo de propagação	107
5.1.1.4.	Variação entre os 14 sinais obtidos em cada posição de leitura 108	

5.1.2.	Análises do sinal ultrassônico	110
5.1.2.1.	Prismas S1-3-A	114
5.1.2.2.	Prismas S1-3-B	124
5.1.2.3.	Prisma S2-20-C.....	131
5.1.2.4.	Considerações sobre os modos de leitura: parâmetros, posições sensíveis e frequência de transmissão	133
5.1.2.5.	Comparativo entre os tipos de resina epóxi.	134
5.1.2.6.	Percentual de alteração no valor absoluto do parâmetro em função do percentual de aplicação da resina	136
5.1.3.	Análises do sinal ultrassônico das leituras de referência no concreto	139
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	143
6.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	145
	REFERÊNCIAS.....	147
	APÊNDICE A – Caracterização dos agregados.....	155
	APÊNDICE B – Tempo de propagação	157
	APÊNDICE C – Energia Total	161
	APÊNDICE D – Amplitude máxima	164
	APÊNDICE E – Janelas de tempo (T25; T50; T75; TC)	168
	ANEXO A – Boletins Técnicos.....	185
	ANEXO B – Laudo Técnico do Cimento	195

1. INTRODUÇÃO

O estudo do concreto estrutural é considerado por potências mundiais como um dos mais importantes investimentos na ciência e tecnologia no sentido de se obter e manter não só a qualidade de vida de seus povos, mas a liderança de seus parques industriais (HELENE; ANDRADE, 2007). Esses países consideram que o profundo entendimento do concreto posiciona e alimenta a indústria, assegurando uma elevada competitividade. Sabe-se que a maioria da infraestrutura que suporta certos setores das atividades humanas são baseadas em materiais cimentícios. Pontes, estradas, obras de saneamento entre outras estruturas são construídas em concreto e tais edificações suportam ações externas e estão sujeitas a deterioração pela variação de temperatura e ataques de agentes ambientais durante a vida útil (AGGELIS; CHAI; SHIOTANI, 2012).

Entretanto, ainda é comum que o aprendizado da engenharia de estruturas seja realizado nos âmbitos de projeto e execução, de modo a ter como maior ênfase as futuras edificações. Por razões econômicas, sociais, patrimoniais ou históricas, torna-se necessária a avaliação do que já existe, a fim de que a estrutura obtenha bom desempenho futuro, ou seja, forneça segurança, durabilidade e atenda vida útil de projeto (SOUZA; RIPPER, 1998). Ainda que o projeto e a execução das estruturas tenham seguido as normas vigentes, podem ocorrer problemas de natureza variáveis como incêndios, sobrecargas não previstas, recalques diferenciados, entre outros, que afetam a vida útil da estrutura (FIGUEIREDO, 1989). Nesse sentido, a despeito dos avanços nas técnicas de projeto e de execução de estruturas de concreto, é importante investir no entendimento da manutenção e da reabilitação dessas estruturas, para o que se faz fundamental a investigação e o diagnóstico corretos.

Os ensaios não destrutivos (ENDs) são importantes ferramentas para auxiliar no entendimento do mecanismo de ocorrência de manifestações patológicas e oferecem suporte na tomada de decisões para o diagnóstico de uma edificação danificada. Seguindo essa linha de pensamento, verifica-se que a demanda para o desenvolvimento de técnicas de ensaios não destrutivos em estruturas de concreto tende a aumentar na medida em que cresce a preocupação com a deterioração da infraestrutura mundial. De acordo com Hellier (2011) os ENDs, como tecnologia, têm tido um crescimento significativo em inovação nos últimos 25 anos e desempenham um papel importante na minimização de quedas de desempenho nas estruturas.

O controle de qualidade, a avaliação estrutural, a manutenção e o aumento da vida útil tornaram-se alvos de importantes questões nos últimos anos e recentemente os ensaios não destrutivos tem se tornado cada vez mais essenciais para efetuar a avaliação da integridade de estruturas de concreto de forma confiável e econômica, não apenas nas novas construções como também nas edificações já existentes (KARAIKOS *et al.*, 2015).

Nos últimos anos no Japão, por exemplo, a reabilitação e a manutenção da infraestrutura tornaram-se importantes temas, sendo que a inspeção e o diagnóstico são considerados as principais etapas do ciclo de manutenção. Os ensaios destrutivos, embora tragam bons resultados, danificam a estrutura, e, em situações que apresentam alta variação de resultados conforme a posição da análise, como é o caso dos túneis, o seu uso torna-se difícil em larga escala. Portanto, as vantagens do uso dos ENDS estão na aplicação em escala global da estrutura e na eficiência na avaliação das condições de degradação (IRIE *et al.*, 2008).

A deterioração de estruturas de concreto é um fator preocupante quando se vive em um país em desenvolvimento como o Brasil. Sendo difícil a obtenção de recursos para a construção de novas edificações, a solução encontrada é a recuperação de estruturas antigas. Desse modo, os ENDS surgem como importantes técnicas que contribuem para a eficiência dos processos de reabilitação das estruturas (COSTA, 2004).

Estudos apontam as fissuras como as principais manifestações patológicas que atingem o concreto nas edificações. Tendo em vista o forte potencial dessa manifestação no comprometimento da durabilidade e da segurança das estruturas, são necessárias técnicas que avaliem o seu comportamento e permitam efetuar o controle e a escolha do sistema de reabilitação.

De acordo com o ACI 244.1 (2007), as boas técnicas de reparo de fissuras dependem do entendimento de suas causas e da seleção de procedimentos apropriados de reparo que levam tais causas em consideração. O conhecimento da espessura e da profundidade de fissuras torna-se útil, por exemplo, para o tratamento de fissuras executado pela técnica de injeção de resinas sintéticas, pois a correta aplicação e a seleção da bomba de pressão dependem, dentre outros fatores, desses conhecimentos (SOUZA e RIPPER, 1998).

A aplicação de resina epóxi é utilizada para o tratamento de fissuras com o objetivo de proteger o concreto contra a entrada de agentes degradantes, mas também para restaurar o monolitismo da estrutura de modo a se recuperar a resistência prevista no projeto (ACI E706, 2009). Conforme menciona o boletim técnico, ainda que as resinas excedam a

resistência do concreto, garantir uma aplicação com o preenchimento completo da fissura é uma tarefa difícil, em especial para tabuleiros de pontes e pisos, já que são estruturas expostas ao tráfego e possuem sujidades que dificultam a aderência da resina à fissura. Portanto, uma aplicação de resina malsucedida pode levar a interpretações visuais errôneas da condição da estrutura e, conforme apresenta o estudo de Tsangouri *et al.* (2015), a recuperação da resistência e da rigidez de um prisma de concreto é inferior se comparada à recuperação com um preenchimento completo.

De acordo com Aggelis, Shiotani e Polyzos (2009) um ponto crucial que não tem recebido muita atenção é a avaliação do reparo após a injeção de epóxi, sendo que o percentual de preenchimento da fissura ainda não consegue ser estimado. O ACI E706 (2009) informa que a comprovação da efetividade da injeção é realizada pela retirada de testemunhos, sendo esse um ensaio destrutivo que nem sempre é capaz de analisar a estrutura por completo, já que não é utilizado em larga escala; já outros autores têm executado testes de carga para verificar se a utilização da resina recuperou a resistência de um concreto danificado (SHASH, 2005) (ISSA; DEBS, 2007). Acredita-se que previamente a esses ensaios, torna-se fundamental o uso de uma técnica não-destrutiva que verifique antecipadamente a eficácia do preenchimento e assim se evite o uso do teste de carga ou as extrações de testemunhos, que podem causar danos à estrutura no caso de um preenchimento impróprio. Portanto, o uso de um ensaio não destrutivo que possibilite a verificação do total preenchimento da fenda garantirá a eficácia e a qualidade da técnica de reabilitação, além de trazer segurança na utilização da estrutura, sem implicar danos ao concreto.

Uma técnica que tem sido utilizada com sucesso há anos é o ensaio de ultrassom, devido ao seu caráter não destrutivo e ao seu baixo custo (ANTONACI *et al.*, 2007). Esse tipo de ensaio verifica, geralmente pela análise da velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU), dada pela velocidade da onda longitudinal ou primária, a heterogeneidade do concreto, a existência de fissuras e de vazios, entre outras aplicações.

Contudo, no estudo realizado por Carelli (2014) para avaliação do estado de fissuração, verificou-se que, em geral, a sensibilidade obtida pela VPU em estruturas de concreto e argamassa foi significativamente menor do que pelos parâmetros do formato da onda de ultrassom. Essa constatação sinaliza a importância da análise do formato do sinal para uma avaliação mais precisa e eficiente do estado de fissuração do elemento. Atualmente, em várias partes do mundo pesquisas têm sido realizadas para investigar a sensibilidade de outros parâmetros obtidos

pelo formato da onda na utilização da técnica de ultrassom (CARELLI, 2014), pois a velocidade de pulso é medida pelo primeiro distúrbio da onda, sendo esse o recurso que menos representa a condição interna do concreto (SHIOTANI; AGGELIS, 2009). Outros autores, que serão citados no referencial teórico, também têm obtido resultados positivos com o uso de outros parâmetros da onda, o que demonstra uma forte tendência de se avaliar, nos ensaios, o comportamento das ondas.

Como a velocidade de propagação da primeira onda do sinal do ultrassom não é capaz de detectar o pleno preenchimento da fissura (MEDEIROS, 2007), acredita-se que o uso da análise da energia do sinal do ultrassom pode trazer resultados encorajadores e confiáveis. Os autores Aggelis, Shiotani e Polyzos (2009) mencionam que como epóxi cria um caminho adicional para o trajeto da onda, os parâmetros do sinal transmitido sofrem influência e podem ser sensíveis ao dano. Aggelis, Leonidou e Matikas (2012) verificaram que a amplitude do sinal apresentou uma sensibilidade maior aos danos existentes sob uma superfície visualmente íntegra, por meio da leitura ultrassônica indireta em comparação à velocidade da onda. Deste modo o estudo de uma técnica capaz de detectar o dano existente sob superfícies íntegras, caso em que a aplicação de epóxi é executada apenas na superfície da fissura, trará benefícios para análise de preenchimentos com resina. Nesse caso mesmo que a falha seja interna e não visível na superfície, no caso de detecção, o tratamento poderia ser realizado na estrutura antes que a deterioração fosse acelerada por agentes degradantes externos.

Considerando o grande potencial de que a energia do sinal seja sensível para a investigação de fissuras e para os serviços de reparo (HOFFMAN, 2015), nesta pesquisa pretende-se fazer uso dos parâmetros relativos a energia do sinal ultrassônico para a verificação do pleno preenchimento de fendas superficiais induzidas em estruturas de concreto por meio do modo de leitura indireto do ultrassom. Acredita-se que essas informações serão importantes para o meio técnico-científico, de forma a aprimorar o uso do ultrassom em futuras pesquisas e em ensaios in situ, garantindo a qualidade de serviços de reparo.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Analisar a sensibilidade dos parâmetros associados ao sinal ultrassônico na verificação da integridade do preenchimento com o sistema epóxi em fendas superficiais de estruturas de concreto

1.1.2. Objetivos específicos

- a. Verificar a influência da profundidade das fendas em relação à detecção de alterações do percentual de preenchimento de epóxi;
- b. Verificar a influência da posição de leitura na detecção de alterações do percentual de preenchimento de epóxi;
- c. Examinar a influência da frequência de transmissão dos transdutores (54 kHz e 200 kHz);
- d. Verificar a influência da pressão de acoplamento;
- e. Avaliar a sensibilidade dos parâmetros do sinal para resinas com diferentes valores de impedância acústica;
- f. Verificar se o sinal obtido para uma região de concreto íntegro pode ser utilizado como referência para análise do sinal de uma fenda completamente preenchida.

1.2. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

De acordo com Kee e Zhu (2014) estruturas de concreto submetidas a ações externas influenciam nos resultados obtidos para análise de fissuras com o sinal ultrassônico e deste modo nesta pesquisa as amostras estudadas não estão condicionados a nenhum tipo de tensão. Além disso espécimes utilizados não possuem barras de aço e as fendas induzidas encontram-se abertas, com geometria retangular, sem efeito da carbonatação ou sujidades que alterem os valores de abertura e profundidade das fendas

1.3. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O **Capítulo 1** contém o problema de pesquisa e seus objetivos, bem como delinea as principais justificativas para a realização deste estudo e as limitações do trabalho.

O **Capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica e discorre sobre os tipos de fissuras, sua classificação, causas e o tratamento com resina epóxi. Descreve o uso do ensaio não-destrutivo com o ultrassom em estruturas de concreto abordando as análises de diversos parâmetros da onda ultrassônica.

O **Capítulo 3** apresenta o programa experimental utilizado. São delineados os materiais e os métodos empregados nesta pesquisa, o

padrão de ensaio e a forma de aplicação da resina, a fim de que se possa atingir os objetivos propostos.

No **Capítulo 4** encontram-se os resultados obtidos para cada parâmetro analisado.

O **Capítulo 5** contempla as análises e discussões dos resultados obtidos.

O **Capítulo 6** apresenta as considerações finais e as recomendações para os trabalhos futuros.

Por fim são apresentadas as referências utilizadas neste trabalho, o apêndice e os anexos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. TRATAMENTO DE FISSURAS

Ainda que o concreto possua elevada durabilidade e boa resistência à compressão, esse material é vulnerável a uma série de fatores degradantes, tanto operacionais como ambientais, que podem reduzir seriamente a vida útil do sistema estrutural (KARAIKOS *et al.*, 2015).

A deterioração no concreto é manifestada por meio de fissuras na maioria das estruturas e ocorre quando os fatores degradantes geram tensões superiores a resistência à tração do concreto. Em alguns casos, essas fissuras podem afetar apenas a estética da estrutura, já em outras ocorrências podem significar danos estruturais expressivos e perda da durabilidade, que serão avaliados em função do tipo de estrutura e da natureza da fissura (ACI 224.1, 2007).

De acordo com Aggelis Shiotani e Polyzos (2012), a camada mais externa do concreto sofre uma maior ação da degradação ambiental. A deterioração é observada na forma de fissuras em pequena escala que podem propagar-se para o interior e acelerar a deterioração da estrutura, especialmente caso a armadura se torne exposta ao ambiente, já que as barras estarão desprotegidas e susceptíveis ao processo de corrosão e consequentemente os danos tendem a se agravar de forma considerável.

A fim de saber em que consiste e a que se deve essa anormalidade, é fundamental que se conheça todos os mecanismos que envolvem o problema (FIGUEIREDO, 1989). Desta forma, apresenta-se a seguir o Quadro 2.1 que possui um conjunto de características de um caso de fissuração, fundamentais para formular um diagnóstico preciso.

Quadro 2.1 – Informações importantes sobre as fissuras para um diagnóstico.

GEOMETRIA	Traçado / Abertura / Profundidade; Relação com a armadura; Relação com a geometria do elemento.
DESENHO	Intergranular / Transgranular / Misto; Fissura suja ou limpa.
APARECIMENTO	Antes / durante / após a cura; Antes / depois de terminada a obra / obra em serviço; Dia e hora da primeira aparição.
EVOLUÇÃO	Fissura ativa ou passiva; Variações de abertura e comprimento.
LOCALIZAÇÃO	Tipo de peça estrutural / orientação solar / comparação com elementos análogos;
CAUSA	Ambiente exterior; Mecânico (estático ou dinâmico); Químico e físico.

Fonte: Garcia (1983 Apud FIGUEIREDO, 1989).

Outra informação que deve ser levada em conta é o tipo de estrutura em que a fissura se encontra. Por exemplo, fissuras que são aceitas em estruturas de prédios podem não ser aceitas em estruturas de reservatórios (ISSA; DEBS, 2007).

Para a aquisição de tais informações a respeito das fissuras, pode-se utilizar os seguintes procedimentos (ACI 224.1, 2007):

- Abertura: Por meio de um fissurômetro ou lupa graduada é possível efetuar a medição do valor de abertura da fissura na superfície do concreto.;
- Localização: Representar o desenho da fissura em um “croqui” da peça estrutural em que essa se encontra ou fotografar o dano;
- Existência de movimentação: A verificação pode ser realizada com a utilização de selos de gesso ou de alongômetros dispostos na superfície do concreto.

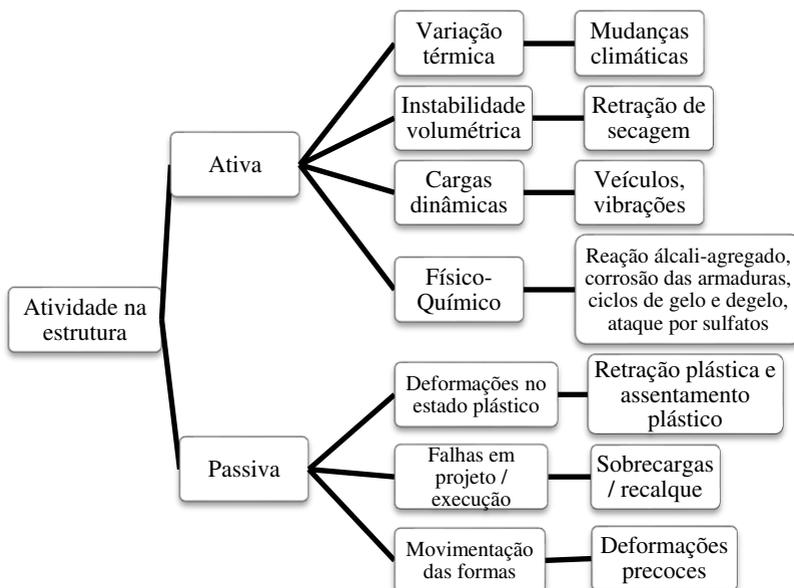
2.1.1. Tipos de fissuras

As fissuras podem ser classificadas quanto ao momento em que aparecem (estado plástico ou endurecido) e também quanto à sua

atividade na estrutura (ativa ou passiva). Como no presente trabalho a ênfase é dada no tratamento das fissuras, a segunda classificação mencionada será mais categórica, em função de ser um fator determinante para a escolha do tratamento.

A Figura 2.1 a seguir apresenta as causas comuns das fissuras ocorridas em estruturas de concreto no estado plástico e no estado endurecido em função da atividade na estrutura.

Figura 2.1 - Causas comuns de geração de fissuras em estruturas de concreto.



Fonte: Adaptado de Figueiredo (1989).

2.1.2. Reparo de fissuras com sistema epóxi

Assim que é concluído o diagnóstico da estrutura fissurada, realiza-se a escolha do procedimento de reparo mais adequado. Neste contexto o entendimento das causas das fissuras é de vital importância para se ter sucesso na terapia (ACI 224.1, 2007; AHMAD *et al.* 2013).

O reparo de fissuras é importante pois a degradação estrutural e a redução na durabilidade de estruturas de concreto armado são aceleradas pela deterioração (SHIN *et al.*, 2011). Um bom reparo melhora o desempenho da estrutura, restaura ou aumenta a resistência e a rigidez,

providencia impermeabilização e previne o ingresso de umidade, oxigênio, gás carbônico, cloretos, etc., de forma a aumentar a durabilidade (SHASH, 2005).

A injeção de resinas sintéticas, com alto poder adesivo, permite restabelecer a monoliticidade de elementos de concreto fissurados. Diversas resinas são para tanto utilizadas, como as acrílicas, as de poliéster e as epoxídicas, sendo essas as de uso mais correntes (SOUZA; RIPPER, 1998). A injeção de epóxi tem sido utilizada com sucesso em reparos de fissuras de edificações, pontes, barragens e outros tipos de estruturas de concreto (ACI 503, 2008). De acordo com Ahmad et. al (2013) a injeção de epóxi é considerada uma das técnicas mais comuns de reparo de fissuras nas últimas duas décadas.

As resinas não são aplicadas isoladamente; necessitam da presença de um catalisador (material com átomos de hidrogênios ativos) para que ocorra a polimerização do material com seu consequente endurecimento (ANDRADE, 2007) e a esse conjunto, resina e catalisador, dá-se o nome de sistema epóxi. Na Engenharia Civil, costuma-se utilizar esse sistema para as seguintes aplicações: injeção de fissuras; união da armadura e concreto em reforços; união de concretos em diferentes idades; adesivos para união de argamassas e concretos em reparos.

O objetivo principal dessa forma de reparo é preencher a fissura e conectar estruturalmente o concreto nos dois lados da abertura, sendo que a movimentação deve ter se estabilizado, ou seja, a fissura deve ser passiva ACI E706 (2009). Algumas das qualidades do sistema epóxi que tornam esse composto cada vez mais utilizados são: baixa retração durante a cura; elevada resistência a tração e compressão; resistência à agentes degradantes e ataques químicos; possui forma líquida sem a presença de solventes voláteis; rápido ganho de resistência; forte adesão ao concreto e aço (ACI 503, 2008).

A ligação entre o concreto e o material de injeção é muito crítica de modo que uma ligação adequada deve restaurar a rigidez prevista em projeto do material e prevenir a infiltração de água e dos agentes degradantes (MINORU *et al.*, 2001).

Os fatores que interferem na boa conduta da técnica de injeção podem ser distribuídos em fatores relacionados ao sistema epóxi, ao substrato, ao comportamento da união sistema epóxi-substrato, à execução da técnica propriamente dita e ao aplicador da técnica (FIGUEIREDO, 1989). De acordo com o autor, a diferença no coeficiente de dilatação térmica do sistema epóxi e do concreto não é um fator preocupante para trabalhos de injeção, pelo fato que as camadas do sistema são muito finas. Ainda assim, pode-se fazer uso de adições de

finos ao sistema, no caso de espessuras maiores, para obter coeficientes de dilatação próximos aos do concreto.

2.1.2.1. Técnica de injeção de fissuras

As fissuras com abertura superior a 0,1 mm devem ser injetadas, procedimento que é executado usualmente sobre baixa pressão ($\leq 0,1$ MPa), exceto em casos que existem aberturas maiores que 3,0 mm e pouco profundas, situações em que se admite o uso de enchimento por gravidade (SOUZA; RIPPER 1998). De acordo com o ACI E706 (2009) se a fissura não compromete a integridade estrutural do concreto, a injeção de poliuretano ou outro material não estrutural pode ser mais adequada. Caso o reparo estrutural seja necessário, é preciso corrigir primeiramente as causas do dano para então aplicar a resina epóxi, e caso a fissura esteja úmida, é preciso utilizar um material tolerante à umidade.

Segundo o ACI E706 (2009) a viscosidade apropriada da resina epóxi é função do tamanho da fissura, da espessura do concreto e do acesso da injeção. Para fissuras com abertura de 0,3 mm ou menores, recomenda-se o uso de resinas com baixa viscosidade (500 cps, ou menores); para dimensões maiores ou em situações onde o acesso da injeção é limitado à uma superfície, uma resina com viscosidade superior é mais adequada. Já em situações em que a seção de concreto é superior a 305 mm, recomenda-se o aumento do tempo de uso do produto além da redução da viscosidade, pois a fissura tende a adquirir aberturas menores conforme se afasta da superfície do concreto. Além desses critérios, também deve-se considerar o módulo de elasticidade, tempo de trabalho (pot life), tolerância à umidade, cor e resistência à compressão, flexão e tração do produto.

A seguir encontram-se os procedimentos para injeção de fissuras com o sistema epóxi (ACI 224.1, 2007):

- Limpeza das fissuras: A primeira etapa consiste na limpeza das fissuras para remoção de óleo, graxa, sujeira e partículas finas do concreto, as quais podem reduzir a penetração do epóxi e eficácia do reparo. A limpeza pode ser realizada aspirando ou lavando com água e em seguida aplica-se ar comprimido, podendo novamente aspirar os grãos que ficarem soltos.
- Selagem da superfície: Torna-se necessário efetuar a selagem das fissuras para que não ocorram vazamentos de epóxi durante a aplicação. Souza e Ripper (1998)

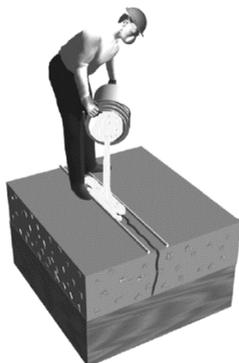
recomendam que a selagem seja executada com aplicação de uma cola epoxídica bicomponente.

- Instalação dos “bicos de injeção”: Pode-se fazer uso de três métodos.
- Efetuar um furo na fissura com aproximadamente 20 mm de diâmetro e com 13 mm a 25 mm abaixo do ápice da seção V, em que os tubos de injeção são conectados. Um sistema de broca e mandril a vácuo previne que a fissura seja conectada com a poeira dos furos.
- Fixar tubos plásticos, diâmetro inferior ao da furação, com parede pouco espessa, pelo qual é injetado o produto (SOUZA; RIPPER, 1998). Os autores recomendam comprovar a eficiência do sistema, aplicando-se ar comprimido para testar a intercomunicação entre os furos e a efetividade da selagem.
- Omitir selagem em uma parte da fissura fazendo uso de gaxetas que permitem a injeção do adesivo diretamente na fissura sem que ocorram vazamentos.
- Mistura do epóxi: É executada a mistura dos produtos para o preparo do sistema epóxi conforme orientações do fabricante. Pode-se utilizar o método de lotes ou o contínuo. No primeiro, os adesivos são pré-misturados com um agitador mecânico, devendo-se ter cuidado para que o material não comece a gelificar, de forma a perder as características de fluidez e a injeção fique mais difícil. O método contínuo de mistura, os dois líquidos passam por bombas de condução e dosagem antes de passarem pela mistura automática de ponta.
- Injeção de epóxi: A pressão utilizada para injeção deve ser selecionada cuidadosamente. O aumento de pressão acelera a taxa de injeção e pode propagar as fissuras existentes, de forma a criar danos adicionais. No caso de fissuras verticais ou inclinadas, o processo de injeção deve começar no ponto de menor elevação e finalizar no ponto mais superior. Para as fissuras horizontais, a injeção deve proceder do final da fissura até o outro lado, sendo necessário repetir o processo até o selamento da fissura. Assim que a pressão consegue ser mantida, considera-se que a fissura se encontra preenchida.

- Remoção da selagem de superfície: Após a cura da injeção, a selagem pode ser removida

A utilização do preenchimento por gravidade pode ser utilizada em fissuras horizontais, com ocorrência em pontes e lajes, por exemplo ACI E706 (2009). Nessa forma de aplicação também se faz uso de uma limpeza da fissura e o preparo adequado do sistema epóxi. A diferença é que não há necessidade de utilizar bicos de injeção, sendo o preenchimento realizado por gravidade. A Figura 2.2 ilustra a aplicação do sistema de forma gravitacional.

Figura 2.2 - Aplicação do sistema epóxi de forma gravitacional.



Fonte: ACI E706 (2009).

O boletim técnico ACI E706 (2009) explica que resinas epóxi com viscosidade inferior à 200 cps devem ser utilizadas na aplicação gravitacional a fim de que sejam capazes de preencher com facilidade as fissuras.

2.1.3. Ensaios experimentais com uso de epóxi para recuperação estrutural

Shash (2005) constatou que as vigas de uma edificação em uso estavam apresentando problemas de fissuração 6 meses após a construção. A análise visual permitiu identificar um padrão de fissuração característico de esforços de flexão e cisalhamento, o que ocasionou a abertura das fissuras entre 0,2 mm e 2 mm. Para melhor compreender os motivos para o aparecimento de fissuras, foram extraídos quatro testemunhos das vigas e verificou-se que o concreto era de baixa

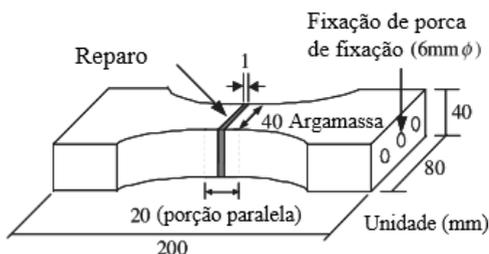
qualidade, com resistência menor que a especificada em projeto. Após a análise estrutural com a consideração da resistência obtida nos ensaios, verificou-se que o concreto estava com qualidade insatisfatória para uso em termos de resistência e, desta maneira, optou-se pela reabilitação da estrutura com a técnica de injeção de epóxi. Após a aplicação da resina, efetuou-se a avaliação da efetividade do serviço de reparo por meio de um teste de carga que constatou a redução nas flechas da viga sendo que a flecha permitida era de 6,4 mm e o valor medido foi de 2,0 mm. No estudo apresentado, o uso da resina epóxi esteve atrelado à função estrutural das vigas e, portanto, existiu a necessidade de se efetuar testes de carga para comprovar a eficiência da técnica de reparo.

Issa e Debs (2007) analisaram a recuperação estrutural de um concreto com fendas induzidas por meio do uso de uma resina epóxi aplicada por gravidade. Para isso foram moldados 9 cubos de concreto com fendas induzidas, dos quais 6 foram preenchidos com a resina, 3 não foram tratados e outros 3 cubos serviram de referência (sem indução de fendas), possuindo o concreto íntegro. Aos 28 dias da moldagem os corpos-de-prova (35 dias para as amostras tratadas com epóxi, em razão da cura do produto) foram rompidos à compressão e se verificou que ocorreu uma redução média de 40% na resistência dos concretos com as fendas não tratadas em relação ao corpo-de-prova íntegro; já as amostras em que foi realizada a aplicação de epóxi, a redução média foi de 11%. Os autores ainda deixaram intencionalmente uma fenda sem a limpeza prévia para a aplicação do epóxi e verificaram que devido à falha na aderência do produto com o concreto, a resistência obtida fora em torno de 60% inferior à resistência obtida das amostras com a limpeza adequada. A pesquisa mostrou a importância de se fazer o tratamento prévio da superfície que receberá a aplicação da resina epóxi e também discutiu a necessidade de se utilizar outras técnicas em conjunto da injeção de resina para o tratamento de fissuras, haja vista que a resistência obtida ainda fora inferior à resistência do concreto íntegro. Os autores ainda comentam que embora a maioria das resinas possua resistência superior à do concreto, garantir o preenchimento completo com uma aplicação por gravidade é uma tarefa difícil e sugerem a extração de testemunhos para avaliar o preenchimento.

Para analisar o comportamento do sistema epóxi no tratamento de fissuras perante a movimentação devido ao efeito da temperatura, Shin *et al.* (2011) utilizaram um programa experimental que analisou a resistência à fadiga do tratamento. Primeiramente aplicaram-se duas resinas, uma rígida e outra flexível (coeficiente de expansão térmica $3,5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $8 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, respectivamente, em uma parede de concreto

que apresentava fissuras. Os valores das movimentações antes e depois das fissuras foram medidos por meio de microscópios de alta precisão. Em seguida, utilizou-se um corpo-de-prova de argamassa, conforme Figura 2.3, para a análise da resistência à fadiga das resinas em quatro temperaturas (5 °C, 20 °C, 30 °C e 40 °C). O ensaio assumiu que a máxima variação térmica diária seria de 30 °C de modo a utilizar o valor de movimentação de 0,003 mm para o epóxi rígido e 0,05 mm para o epóxi flexível (tais valores foram medidos previamente em campo). Embora a movimentação foi calculada em um período de 24 horas, para os ensaios utilizou-se um intervalo de tempo de 30 segundos, a fim de se acelerar a fadiga e configurou-se o ensaio para um ciclo de 30.000 vezes que equivale a aproximadamente 100 anos (consideração de um movimento por dia). O ensaio foi realizado com os valores de movimentação de 0,001, 0,002 e 0,003 mm para o epóxi rígido e 0,01, 0,03 e 0,05 mm para o epóxi flexível. O estudo verificou que a injeção de epóxi proporcionou reduções nos deslocamentos da estrutura, porém, ao se considerar ensaios de fadiga, constatou-se que os deslocamentos para a ruptura podem ser menores que os obtidos no ensaio estático em função da ocorrência de fadiga, assim como que para ambas as resinas o número de ciclos para a ruptura foi reduzido, para uma dada movimentação conforme se aumentou a temperatura.

Figura 2.3 - Dimensões do corpo-de-prova para o ensaio de fadiga do epóxi.



Fonte: Shin *et al.* (2011).

Portanto é necessário verificar previamente qual a condição de movimentação existe na estrutura que será tratada, além das causas da fissuração para que o produto utilizado atenda as expectativas.

Ahmad *et al.* (2013) elaboraram vigas de seção transversal 152,4 x 304,8 mm² e comprimento de 3351 mm em que uma série possuía três amostras com apenas armadura longitudinal e a outra série continha três amostras com armadura longitudinal e transversal. Realizou-se o ensaio

de tração na flexão até o aparecimento de fissuras com aberturas de 1 mm, momento em que a carga foi retirada e os danos foram tratados com epóxi. Verificou-se que a injeção de epóxi em fissuras de tração e de cisalhamento proporcionou um aumento na capacidade de carregamento da viga (aumento de 49% na capacidade de carga) e que a tensão de ruptura (tração) foi 47% maior para as vigas com armaduras longitudinais e transversais. A pesquisa mostra que a técnica de injeção de fissuras aumentou a capacidade de carga da estrutura com o uso de um ensaio de carga.

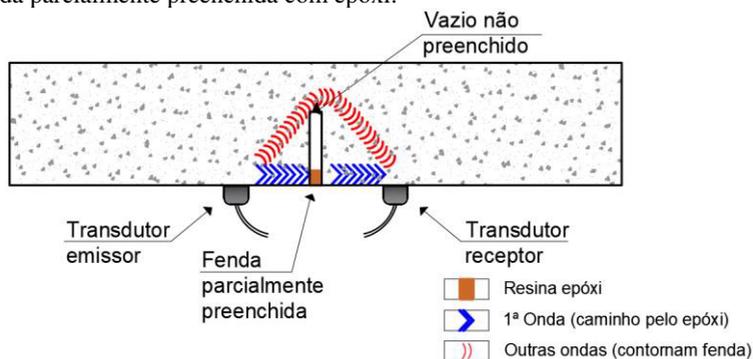
Os estudos anteriores mostram que quando a aplicação de epóxi é executada de forma adequada, pode-se restaurar a segurança e o monolitismo da estrutura. Entretanto, o sucesso da técnica está ligado a diversos fatores, como a experiência do aplicador, a correta seleção da bomba de injeção e da resina a se utilizar além da limpeza adequada das bordas da fissura, conforme mencionado anteriormente, a fim de garantir que o produto preencha por completo a fissura. É necessário, portanto, certificar-se após a injeção em campo que o sistema epóxi preencheu de forma adequada os vazios para que o desempenho esperado do reparo seja atingido. As pesquisas utilizaram testes de cargas e extrações de testemunhos nas peças que tiveram o reparo, para comprovar a eficiência da técnica de injeção. Souza e Ripper (1998) descrevem que a comprovação da efetividade da injeção pode ser realizada com a retirada de testemunhos, que compreendam a profundidade da fissura, admitindo-se como uma injeção satisfatória quando 90% do comprimento da fissura estiver preenchida. Deve-se atentar a orientação da fissura e a presença de armaduras, pois dificultam o uso de extrações de testemunhos para análise da eficiência (ACI 224.1, 2007).

Acredita-se que previamente a esses ensaios, seria interessante o uso de uma técnica não-destrutiva para verificar se o preenchimento foi eficaz e assim evitar que o teste de carga ou as extrações de testemunho causassem maiores danos à estrutura no caso de um preenchimento impróprio. Desta maneira, a técnica não destrutiva complementar o estudo e permitiria uma análise mais rápida e em maior escala para uma situação com um número de peças estruturais para tratamento maior. Como existem situações em obra em que a aplicação de injeção é realizada para diferentes seções, como no caso de túneis, e com diferentes comprimentos e profundidades, os ensaios não-destrutivos permitiriam uma verificação global em campo, com o objetivo de servir como um controle de qualidade, sem ter que efetuar a extração de testemunhos de forma desenfreada.

Aggelis, Shiotani e Polyzos (2009) mencionam que em muitos casos, um percentual elevado da fissura não é preenchido, especialmente se a injeção não for conduzida com a pressão adequada. Os autores mencionam que a avaliação da eficiência do reparo não é uma tarefa trivial e o uso da velocidade de pulso da onda de tensão do ultrassom que viaja pelo caminho com epóxi resulta em dificuldades na obtenção da extensão do preenchimento. O ACI E706 (2009) menciona que além da extração de testemunhos, a verificação do preenchimento pode ser realizada com técnicas não destrutivas, como o eco-impacto, velocidade de pulso do ultrassom e análise do formato de ondas mecânicas.

O estudo de Medeiros (2007) verificou que o uso do ultrassom com o parâmetro da velocidade de propagação da primeira onda do sinal não foi capaz de identificar quando uma fenda fora preenchida por completo, pois nas situações em que a abertura está selada superficialmente, a primeira onda não contorna a fissura; ao invés disso, atravessa o menor caminho. Conforme ilustra a Figura 2.4, a primeira onda percorre o caminho superficial (azul), pois o tempo de propagação dessa onda, a qual passa pelo epóxi, é inferior ao tempo daquela que contorna a fissura (vermelho); desta forma o resultado da velocidade de propagação não apresenta informações a respeito do vazio, independente de proporção de resina existente na fissura.

Figura 2.4 - Caminho percorrido pelo pulso ultrassônico em uma viga com uma fenda parcialmente preenchida com epóxi.



Fonte: Adaptado de Medeiros (2007).

O ensaio de ultrassom utilizando os parâmetros de energia, analisa não apenas a primeira onda, mas sim, todo um grupo de ondas do sinal, tanto as que passam pelo epóxi, quanto as que contornam a fissura. Desta

forma, têm-se a hipótese que com a utilização de tais parâmetros, é possível analisar as alterações no sinal e relacioná-los com o percentual de preenchimento da fissura.

A seguir será apresentado com maior detalhamento o uso do ultrassom em estruturas de concreto.

2.2. ULTRASSOM NO CONCRETO

Segundo o ACI 228 (2013), pode-se definir ensaios não destrutivos como os ensaios que não causam danos significativos ao concreto. As principais aplicações das técnicas não destrutivas são para: o controle de qualidade de novas construções; a avaliação da condição de estruturas de concreto antigas por propósitos de reabilitação; a garantia de qualidade de reparos em concreto e solução de problemas em novas obras.

Considera-se, portanto, o uso do ultrassom como uma técnica não destrutiva já que se utiliza de ondas mecânicas que não resultam nenhum dano ao concreto.

2.2.1. Onda, Frequência, Velocidade e Comprimento de Onda

2.2.1.1. Onda mecânica

Onda é uma perturbação que ao propagar-se de um ponto a outro em determinado meio, transmite energia sem o transporte de matéria. A onda pode ser classificada como mecânica quando necessita de um meio material para propagar-se sendo nesse arranjo que se enquadram as ondas acústicas (SEARS *et al.* 2008).

2.2.1.2. Frequência

A classificação de qualquer som é realizada pela sua frequência, medida em ciclos por segundo, ou seja, o número de ondas que passam por segundo pelo sistema que recebe o som. A unidade de medida utilizada pelo sistema internacional é o “Hertz”, cuja abreviatura é o “Hz”. Sons com frequência abaixo de 20 Hz são denominados infrassons e os que se situam acima de 20000 Hz ou 20 kHz, são os ultrassons (ANDREUCCI, 2016).

2.2.1.3. Velocidade de propagação

De acordo com a NBR 8802 (2013) o termo “Velocidade de Propagação” pode ser definido como sendo a relação entre a distância percorrida por uma vibração e o respectivo intervalo de tempo.

A velocidade de propagação é uma característica do meio e depende das propriedades elásticas e da massa do meio, e, portanto, independe da frequência (BUNGEY *et al.* 2006).

2.2.1.4. Comprimento de onda

O comprimento de onda é a distância entre dois pontos de máximos ou de mínimos consecutivos, medida em um mesmo instante e na direção de propagação de uma onda senoidal (SEARS *et al.* 2008).

2.2.2. Relação entre Velocidade, Comprimento de onda e Frequência

A relação entre a Velocidade (v), a frequência (f) e o comprimento de onda (λ) é uma equação já consagrada da física, dada pela Equação 2.1:

$$v = \lambda \cdot f \quad (\text{Equação 2.1})$$

Em função do conhecimento da frequência do emissor e, em geral, da velocidade da onda ultrassônica, pode-se obter o valor do comprimento de onda, pela adaptação da Equação 2.1, conforme Equação 2.2 a seguir:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Com esta equação pode-se tomar uma decisão de qual transdutor utilizar. De acordo com Bungey *et al.* (2006) a dimensão do membro sob ensaio é um importante fator para a seleção do transdutor, pois o comprimento de onda deve ser menor que o caminho da onda e as dimensões dos agregados, afim de que não ocorram reduções de energia e perda de sinal. A norma britânica BS 1881 (1986) faz essa consideração e recomenda que para aplicações usuais a frequência dos transdutores deve estar entre 20kHz e 150kHz.

Segundo Costa (2004) sinais de alta frequência possuem um começo bem definido, entretanto, conforme passam pelo concreto, tornam-se atenuados mais rapidamente que os pulsos de frequências

menores. Isto quer dizer que para distâncias de propagação curtas, o uso de transdutores de alta frequência é mais utilizado, já nos ensaios onde o caminho a ser percorrido pela onda é maior, os transdutores de baixa frequência são mais recomendados.

De acordo com Naik *et al.* (2004) os transdutores com frequência de 25 a 100 kHz são mais comumente usados em testes no concreto. Frequências acima de 100 kHz ou abaixo de 25 kHz são utilizadas para aplicação especiais, tais como concretos de alta resistência ou em pequenos corpos-de-prova e concretos com agregados de elevada dimensão ou em grandes corpos-de-prova, respectivamente. Bungey *et al.* (2006), comentam que o transdutor de frequência natural de 54 kHz é o mais comumente utilizado nas aplicações usuais.

Ainda assim, o estudo de Philippidis e Aggelis (2005) verificou que sinais com maior frequência (menor comprimento de onda), apresentam maiores níveis de atenuação e, portanto, esses pulso tendem a ser mais sensíveis para detecção de menores danos. Alguns estudos do GPEND, como o de Carelli (2014), Hofmann (2015) e Viana (2017) utilizaram o transdutor com frequência de 200 kHz, que se mostrou adequado para a detecção de fissuras e análises do formato da onda.

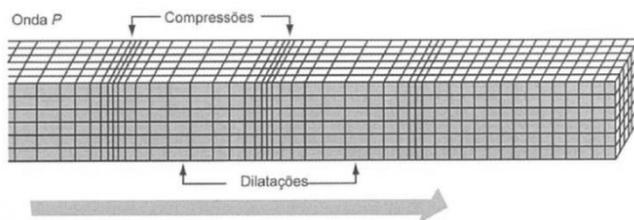
2.2.3. Tipos de ondas

Segundo Andreucci (2016) a passagem de energia acústica no meio faz com que as partículas que o compõem, executem o movimento de oscilação em torno da posição de equilíbrio, cuja amplitude do movimento será diminuída com o tempo, em decorrência da perda de energia adquirida pela onda. Considerando-se que o meio em estudo é elástico, ou seja, que as partículas que o compõem são rigidamente ligadas, mas que podem oscilar em qualquer direção, pode-se classificar as ondas acústicas em quatro tipos:

2.2.3.1. Ondas Longitudinais ou de Compressão

As ondas longitudinais (também conhecidas como ondas P) são as ondas cujas partículas oscilam na direção de propagação do pulso, sendo as mais rápidas, conforme ilustra a Figura 2.5.

Figura 2.5 - Onda longitudinal (compressão) ou onda P.

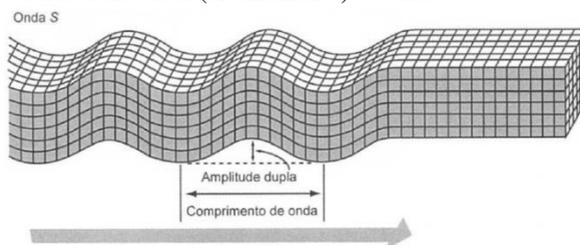


Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

2.2.3.2. Ondas Transversais ou de Cisalhamento

Também conhecidas como ondas S, nessas ondas, as partículas oscilam em movimentos ortogonais à direção de propagação do pulso e suas velocidades são em torno de 60% da velocidade da onda de compressão no concreto (NAIK *et al.*, 2004). A Figura 2.6 apresenta o esquema da onda transversal

Figura 2.6 - Onda transversal (cisalhamento) ou onda S.

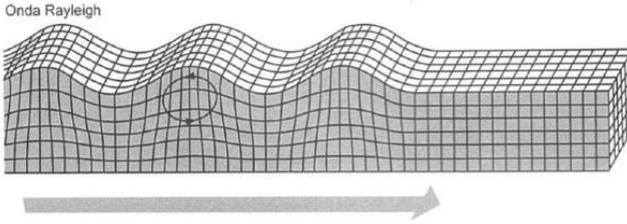


Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

2.2.3.3. Ondas Superficiais ou de Rayleigh

Essas ondas possuem um deslocamento elipsoidal das partículas e são as mais lentas com velocidades em torno de 55% da velocidade da onda de compressão no concreto (NAIK *et al.* 2004). A energia dessas ondas se propaga em espessuras iguais à dimensão de um comprimento de onda e podem atingir maiores distancias e maior quantidade de energia, ao se comparar com as Ondas P e S (GRAFF, 1975). A Figura 2.7 apresenta a onda superficial (Rayleigh).

Figura 2.7 - Onda transversal (Rayleigh).



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

2.2.4. Impedância acústica

A Impedância acústica é um importante parâmetro utilizado para avaliar a transmissão e reflexão acústica na fronteira entre dois materiais que possuem diferentes composições (ARMITAGE, 2009).

O valor deste parâmetro é obtido por meio do produto entre a densidade e a velocidade de propagação da primeira onda longitudinal do material, conforme Equação 2.3 (HELLIER, 2011):

$$Z = \rho \times V \quad (\text{Equação 2.3})$$

onde

Z = impedância acústica [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

ρ = densidade do material [kg/m^3]

V = velocidade de propagação da primeira onda longitudinal do material [m/s]

A Tabela 2.1 apresenta os valores de impedância acústica calculados para diferentes materiais

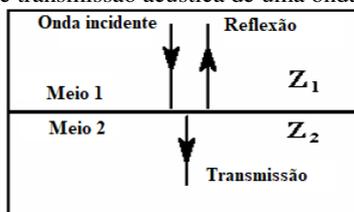
Tabela 2.1 – Impedância acústica de diferentes materiais.

Material	Impedância Acústica ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
Ar	0,4
Água	$1,5 \cdot 10^6$
Solo	0,3 a $4 \cdot 10^6$
Concreto	7 a $10 \cdot 10^6$
Calcário	7 a $19 \cdot 10^6$
Granito	15 a $17 \cdot 10^6$
Aço	$47 \cdot 10^6$

Fonte: (Naik *et. al.*, 2004)

Quando uma onda de tensão incide sobre a interface entre dois materiais diferentes, uma porção da onda é refletida. A amplitude da onda refletida é função do ângulo de incidência e possui o valor máximo para uma incidência normal à superfície, conforme ilustra a Figura 2.8 (ACI 228, 2013).

Figura 2.8 - Reflexão e transmissão acústica de uma onda incidente.



Fonte: ARMITAGE (2009)

Para uma incidência normal, o coeficiente de reflexão R é dado pela seguinte expressão (Equação 2.4) (KINSLER *et. al*, 1999):

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{Equação 2.4})$$

onde

R = razão da pressão sonora entre a onda refletida e a pressão sonora da onda incidente

Z_2 = Impedância acústica do Material 2, e

Z_1 = Impedância acústica do Material 1.

De maneira similar, pode-se determinar o coeficiente de transmissão T , conforme Equação 2.5 (KINSLER *et. al*, 1999):

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{Equação 2.5})$$

Para incidências oblíquas, recomenda-se a leitura dos trabalhos de Thomson (2012) e Hellier (2011).

Portanto, para uma onda de tensão que incide no concreto e encontra uma interface com ar, o valor absoluto do coeficiente de reflexão é próximo de 1,0, ou seja, ocorre aproximadamente reflexão total nesta interface. É por esta razão que os ensaios não-destrutivos baseados na

propagação de ondas de tensão têm obtido sucesso na detecção de danos internos no concreto (ACI 228, 2013).

De acordo com Hellier (2011) a propriedade de reflexão pode ser um problema no caso de o transdutor ser simplesmente apoiado sobre a superfície do material em que será realizado o ensaio devido a interface de ar entre o material e o transdutor. Como o ar reflete em torno de 100% da energia, não haveria transmissão de energia através do material de análise.

Para solucionar este problema utiliza-se um material acoplante na forma de líquido, pasta ou graxa entre o transdutor e o material em que será realizado o ensaio. Desta forma, o sinal não é completamente refletido permitindo a transmissão de sinal.

2.2.5. Ensaio de ultrassom

De acordo com Naik *et al.* (2004) o ensaio com a velocidade de pulso do ultrassom, tem sido utilizado com sucesso para avaliar a qualidade do concreto por mais de 60 anos. Esse ensaio pode ser utilizado para detectar fissuras internas e outros defeitos, como a deterioração por agressividades ambientais, além de ser possível estimar a resistência à compressão do concreto.

A velocidade da onda de compressão, para um meio infinito, homogêneo e isotrópico, pode ser descrita conforme a Equação 2.6 (BUNGEY *et.al.*, 2006; NAIK *et al.*, 2004).:

$$V = \sqrt{\frac{K.Ed}{\rho}} \quad (\text{km/s}) \quad (\text{Equação 2.6})$$

onde

V = Velocidade da onda de compressão (km/s);

Ed = Módulo de elasticidade dinâmico (N/mm²);

ρ = Densidade (kg/m³);

$K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu).(1-2\nu)}$;

ν = Coeficiente de Poisson dinâmico;

No ensaio de ultrassom, que faz uso do parâmetro de velocidade de propagação da primeira onda do sinal, um impacto é gerado pelo transdutor emissor em um ponto da superfície da amostra ensaiada e o tempo de viagem da primeira onda de um ponto ao outro é medido. Sabendo-se a distância entre os pontos, o valor da velocidade de

propagação pode ser determinado, conforme indica a NBR 8802 (ABNT, 2013) com a Equação 2.7:

$$V = \frac{L}{t} \quad (\text{Equação 2.7})$$

onde

V = Velocidade de propagação (m/s);

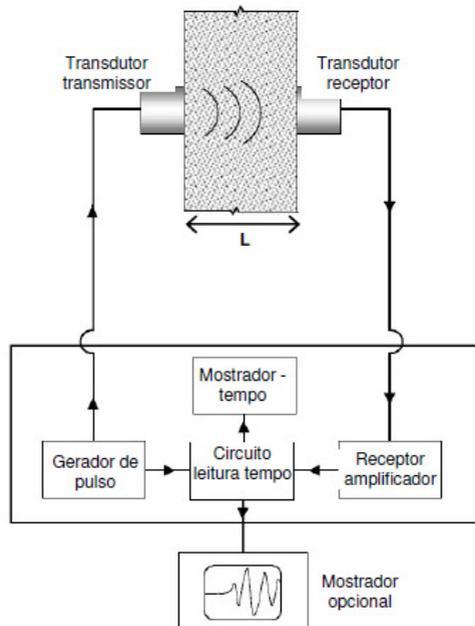
L = Distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores (m);

t = Tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (s).

2.2.6. Equipamento de ultrassom

O equipamento de ensaio deve ser capaz de gerar um impulso mecânico pelo transdutor emissor, transmiti-lo pelo concreto, receber o sinal pelo transdutor receptor, amplificá-lo, efetuar a medição e disponibilizar o tempo levado para a detecção do sinal. Os requerimentos do circuito básico encontram-se na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Esquema de funcionamento do ultrassom.



Fonte: Adaptado de Naik *et al.* (2004).

Pulsos repetitivos são gerados eletronicamente e transformados em impulsos de onda de energia mecânica por um transdutor emissor, o qual é acoplado à superfície do concreto. Da mesma forma, um transdutor receptor é acoplado ao concreto, a uma distância conhecida do emissor e converte a energia mecânica em pulsos elétricos, na mesma frequência que foram emitidos (BUNGEY *et al.*, 2006).

De acordo com os autores, o dispositivo mede o intervalo de tempo de saída do transdutor emissor até a chegada do sinal no transdutor receptor, e apresenta o resultado no leitor digital, com uma precisão de $\pm 1\%$.

Os transdutores podem ser fabricados de diversos modelos, embora os de cristal piezoelétrico sejam os mais comuns (BUNGEY *et al.*, 2006). O cristal piezoelétrico pode transformar a energia elétrica em oscilação mecânica e transformar a energia mecânica em elétrica. Este fenômeno é obtido aplicando-se eletrodos no cristal piezoelétrico com tensão elétrica alternada, de maneira que o material se contraia e se estenda ciclicamente. Ao se tentar impedir esse movimento, a placa transmite esforços de compressão às zonas adjacentes, e tais esforços produzem ondas longitudinais, cujo formato depende da frequência de excitação e das dimensões do cristal (ANDREUCCI, 2016).

Antes de iniciar o ensaio é necessário calibrar o aparelho, por meio do bloco de calibração que possui o tempo de propagação do pulso conhecido. Segundo a NBR 8802 (ABNT, 2013) essa peça possibilita a aferição do equipamento ultrassônico e deve possuir a superfície de acoplamento com acabamento polido e vibração do tempo de trânsito gravada. A Figura 2.10 apresenta a calibração do aparelho com a barra de referência.

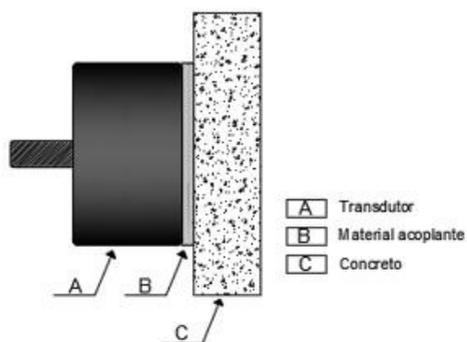
Figura 2.10 - Calibração do aparelho de ultrassom com o material de referência.



Fonte: Manual de instruções - Proceq (2011).

O posicionamento dos transdutores deve ser realizado a fim de que exista o maior contato possível com o concreto e para evitar que surjam bolsões de ar, pelo fato de que no ar apenas uma parcela insignificante da energia é transmitida. Isso é realizado por meio da aplicação de um material acoplante, que pode ser vaselina, graxa ou gel (BUNGEY *et al.*, 2006). Os autores ressaltam que se deve utilizar apenas uma camada fina do material acoplante (Figura 2.11) e que o excesso deve ser retirado. Além disso, a pressão nos transdutores deve ser constante e as leituras devem ser repetidas até que se obtenha um valor mínimo de tempo. No caso de superfícies de concretos muito ásperas, uma maior quantidade de acoplante deve ser utilizada, ou ainda, recomenda-se o nivelamento desta superfície por procedimentos diversos (NBR 8802, ABNT, 2013); (NAIK *et al.*, 2004).

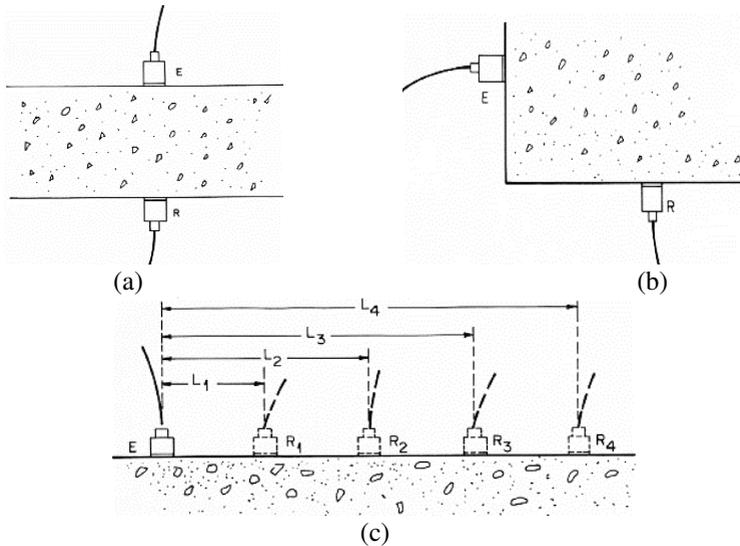
Figura 2.11 - Acoplamento do transdutor no material de ensaio.



Fonte: Adaptado de Bungey *et al.* (2006).

De acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2013) existem três possíveis arranjos dos transdutores para efetuar as leituras dos ensaios, conforme a Figura 2.12.

Figura 2.12 - Configuração para leituras de ultrassom – (a) direta; (b) semidireta; (c) indireta.



Fonte: NBR 8802 (ABNT, 2013).

O modo de transmissão direto apresenta resultados mais satisfatórios pois a máxima energia é recebida e transmitida nessa disposição. Além disso, o caminho percorrido pelas ondas é claramente definido e pode ser medido com melhor precisão, devendo esse modo de leitura, portanto, ser utilizado sempre que possível (BUNGEY *et al.*, 2006).

O modo de transmissão indireto é o menos satisfatório, pois a amplitude do sinal recebido é inferior ao modo direto. Outra razão é que o pulso se propaga na camada mais próxima da superfície do concreto, que muitas vezes é uma região com composição diferente das camadas mais internas do concreto, podendo ter maior concentração de finos, como no caso de lajes por exemplo (NAIK *et al.*, 2004).

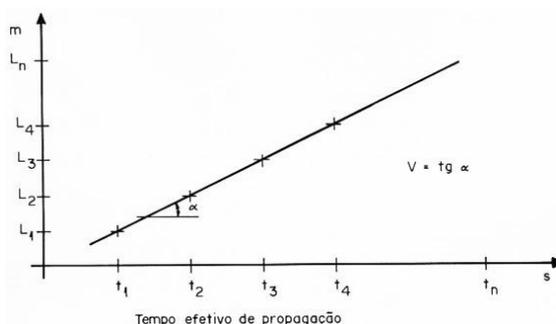
Assim como no modo de leitura direto é possível efetuar o cálculo da velocidade de propagação para o modo indireto. A NBR 8802 (ABNT, 2013) apresenta o seguinte procedimento:

- Fixar o transdutor emissor em um ponto;
- Efetuar a leitura do tempo de propagação com o transdutor receptor nas posições R₁, R₂, R₃ ... R_n, de forma

- equidistantes entre si e sobre uma mesma reta que contém o transdutor emissor fixo;
- Localizar em um sistema cartesiano de eixos as distâncias entre os pontos E e R1 a Rn e os tempos lidos em cada leitura, conforme Figura 2.13.
 - A inclinação da reta é numericamente igual a velocidade de propagação da onda no concreto.

Pode-se dizer que a obtenção desta velocidade indireta é consistente quando os pontos do gráfico da Figura 2.13 estão razoavelmente alinhados.

Figura 2.13 - Gráfico para o cálculo da velocidade indireta.

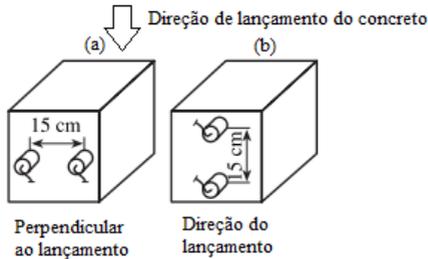


Fonte: NBR 8802 (ABNT, 2013).

Segundo a BS 1881 (1986) o valor da velocidade calculada pelo modo indireto tende a ser 5% a 20% menor do valor da velocidade pelo modo direto, sendo isso função da qualidade do concreto ensaiado.

De acordo com Turgut e Kucuk (2006), o valor da velocidade de pulso no modo direto foi 9% maior que a velocidade medida para o modo indireto. Além disso os autores verificaram que ao se medir a velocidade pelo modo indireto com os transdutores na direção de lançamento do concreto, o valor calculado fora 5% menor que o valor medido na direção perpendicular ao lançamento, conforme Figura 2.14.

Figura 2.14 - Posicionamento dos transdutores conforme a direção de lançamento do concreto.



Fonte: Turgut e Kucuk (2006).

2.2.7. Fatores intervenientes

Sendo o concreto um material heterogêneo, o tempo de propagação da onda ultrassônica depende de uma série de fatores, divididos abaixo em dois grupos (NAIK *et al.*, 2004).

Fatores internos à estrutura de concreto:

- Natureza dos agregados;
- Relação a/c do concreto;
- Idade dos corpos-de-prova;
- Presença de armadura;

Fatores externos à estrutura de concreto:

- Umidade da estrutura;
- Vibração do meio;
- Meio a que a estrutura está exposta;
- Temperatura ambiente;
- Largura da peça a ser ensaiada;
- Modo de acoplamento dos transdutores na superfície;
- Condição da superfície a ser testada.

2.2.8. Aplicações

As aplicações do ultrassom são diversas e pesquisas têm sido realizadas para aprimorar seu uso. A seguir serão listadas as principais utilidades do instrumento e em seguida será apresentado com maior destaque o emprego do ultrassom para detecção de fissuras.

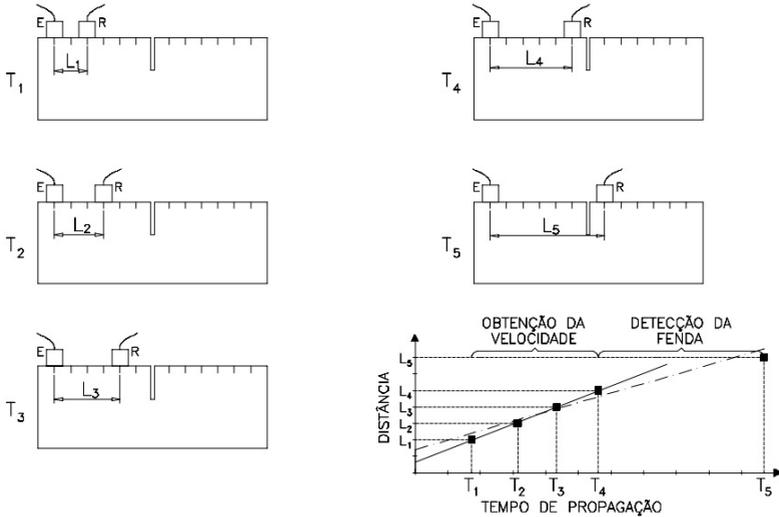
- Determinação do módulo de elasticidade dinâmico e do coeficiente de Poisson;
- Estimativa da resistência à compressão do concreto com o uso de curvas de correlação apropriadas;
- Análise da condição interna do concreto;
- Estudos relativos à hidratação do cimento com o tempo;
- Avaliação da deterioração do concreto devido ao fogo, gelo e degelo ou ataques químicos.
- Monitoramento da evolução de resistência;

2.2.8.1. Medição e detecção de fissuras

De acordo com Bungey *et al.* (2006), como o pulso ultrassônico transmite uma quantidade pequena de energia pelo ar, caso a onda que esteja propagando pelo concreto encontre uma fissura preenchida com ar ou um vazio, o pulso ultrassônico será difratado contornando o defeito. Assim, o tempo de propagação será maior do que em situações com um concreto similar íntegro. O uso da velocidade do pulso ultrassônico é um parâmetro efetivo para localizar fissuras e outros defeitos dessa natureza.

A norma britânica BS 1881 (1986) apresenta uma forma de se detectar uma fissura no concreto com o uso do tempo de propagação da onda do ultrassom para diferentes posições de leitura. A Figura 2.15 apresenta a posição de leitura para a detecção da fenda e o gráfico plotado em função dos dados obtidos (tempo x distância), de forma que as quatro primeiras leituras (anteriores à fenda) servem para calcular a velocidade de propagação, conforme já apresentado e o ponto subsequente, posterior a fenda, caso esteja fora do alinhamento dos pontos anteriores no gráfico, serve para identificar que existe um dano no trajeto da onda, entre os pontos 4 e 5.

Figura 2.15 – Posicionamento dos transdutores para a detecção da fenda e obtenção da velocidade do ultrassom com o modo de leitura indireto.

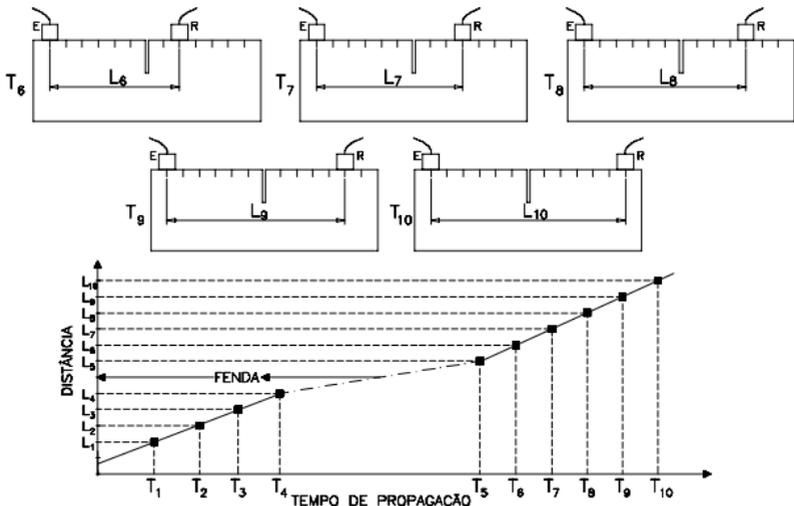


Fonte: Medeiros (2007) – adaptação da BS 1881 (1986).

Portanto, no caso apresentado, a reta que melhor se ajusta aos cinco pontos de leitura irá apresentar um coeficiente angular menor que a reta com os primeiros quatro pontos e também uma queda da velocidade calculada

Ao se prosseguir com as leituras (L₆ a L₁₀), a tendência é que os pontos se alinhem de forma semelhante, conforme pode ser visualizado na Figura 2.16. Isso se dá em decorrência da não existência de danos posteriores à fenda e indica um concreto com característica similar aos quatro primeiros pontos.

Figura 2.16 - Posicionamento dos transdutores para a detecção da fenda.

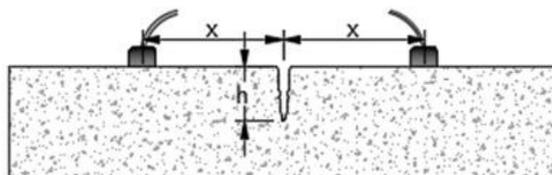


Fonte: Medeiros (2007) – adaptação da BS 1881 (1986).

A partir da detecção da fenda prossegue-se para a estimativa de sua profundidade. Embora existam outros métodos para medir as características geométricas das fissuras, o uso do ultrassom utilizando o tempo de propagação é simples, fácil de aplicar e gera uma rápida indicação da extensão da fissura (PINTO *et al.*, 2010). A seguir serão apresentados alguns modelos utilizados para estimativa da profundidade da fissura.

1) Modelo de Bungey

Bungey *et al.* (2006) propuseram um modelo matemático para estimativa da profundidade de uma fissura perpendicular à superfície do concreto. O ensaio é realizado posicionando os transdutores de forma equidistante à fissura utilizando o arranjo indireto, conforme Figura 2.17. Figura 2.17 - Medida da profundidade de fissura - Bungey *et al.* (2006).



Fonte: Adaptado de Bungey *et al.* (2006).

Percurso sem a fissura (Lc):

$$Lc = 2x \quad (\text{Equação 2.8})$$

Percurso contornando a fissura (Lf):

$$Lf = 2\sqrt{x^2 + h^2} \quad (\text{Equação 2.9})$$

Tempo de propagação sem a fissura (Tc):

$$Tc = \frac{2x}{Vc} \quad (\text{Equação 2.10})$$

Tempo de propagação contornando a fissura (Tf):

$$Tf = \frac{2\sqrt{x^2 + h^2}}{Vc} \quad (\text{Equação 2.11})$$

Considerando que a velocidade da onda pelo concreto com e sem a fissura é a mesma e substituindo o valor de $Vc = 2x / Tc$, tem-se:

$$h = \left(\frac{x}{Tc}\right) \sqrt{Tf^2 - Tc^2} \quad (\text{Equação 2.12})$$

onde

h = profundidade da fissura (mm);

x = distância do transdutor à fissura (mm);

Tf = tempo de propagação ao redor da fissura (μs);

Tc = tempo de propagação, para uma mesma distância entre transdutores, em regiões onde não há fissura (μs);

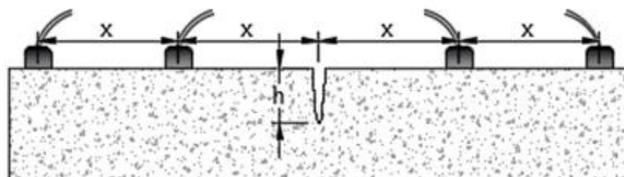
Bungey *et al.* (2006) comentam que é possível obter uma precisão de $\pm 15\%$, porém o afunilamento da fissura, a poeira, as armaduras, as fissuras adjacentes e a própria incerteza do modo de leitura indireto podem influenciar nos resultados. Além disso, a equação considera que a velocidade de propagação do sinal no concreto são e fissurado é a mesma e isso pode levar a erros já que o trajeto percorrido sem a fissura é diferente do percurso que contorna a fissura, não só pela zona de fratura existente próxima a fissura, mas também as diferentes camadas/composições do concreto.

2) Modelo da BS 1881: Part 203 (1986)

O item 9.3 da norma britânica apresenta um procedimento para estimativa da profundidade de fissuras perpendiculares a superfície, também por meio do arranjo indireto, porém são realizadas duas leituras

com os transdutores posicionados a distâncias x e $2x$ da fissura, conforme Figura 2.18. A norma recomenda que os valores sejam de 150 mm e 300 mm.

Figura 2.18 - Medida da profundidade de fissura - BS 1881 (1986).



Fonte: Adaptado de BS 1881 (1986).

Com isso, pode-se obter a equação a seguir:

$$h = x \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (\text{Equação 2.13})$$

onde:

h = profundidade da fissura (mm);

x = distância do transdutor à fissura (mm);

T_1 = tempo de propagação quando a distância é 150 mm (em μs);

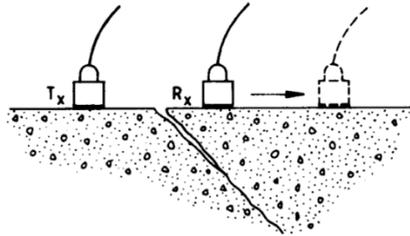
T_2 = tempo de propagação quando a distância é 300 mm (em μs);

O modelo proposto pela Norma faz uso apenas de leituras que contornam a fissura, e, portanto, ao contrário do modelo de Bungey *et al.* (2006), não utiliza os valores obtidos por leituras no concreto íntegro. Desta forma, reduz a incerteza existente no modelo de Bungey *et al.* (2006), já que não considera os valores de velocidade do concreto são e fissurado como equivalentes.

A referida norma apresenta ainda uma checagem que pode ser realizada a fim de constatar se a fissura é perpendicular à superfície ou inclinada, conforme a Figura 2.19. Caso o tempo de propagação seja reduzido quando se fixa o transdutor emissor e se afasta o receptor da fissura, em relação ao tempo da posição com os transdutores mais próximos, pode-se considerar que a inclinação da fissura possui sentido emissor-receptor. No entanto, isso também pode indicar que a fissura é profunda e a confirmação pode ser executada invertendo os transdutores. Caso o tempo de propagação com os transdutores mais próximos for menor que com o receptor mais afastado, pode-se considerar que a fissura é inclinada, conforme a leitura anterior. Todavia, se o tempo for maior

com os transdutores mais próximos, a fissura tende a ser perpendicular à superfície e com elevada profundidade.

Figura 2.19 - Arranjo de transdutores para detecção de fissuras oblíquas.



Fonte: BS 1881 (1986).

3) Método “A” – Pinto *et al.* (2010)

O método “A” proposto pelos autores considera que se deve posicionar os transdutores no mínimo em 4 posições, conforme a Figura 2.20, haja vista que o modo de leitura indireto possui algumas incertezas. Desta maneira, em cada posição são realizadas as leituras do tempo de propagação da onda; considera-se que a velocidade de pulso será a mesma em todos os caminhos, e assim, tem-se que:

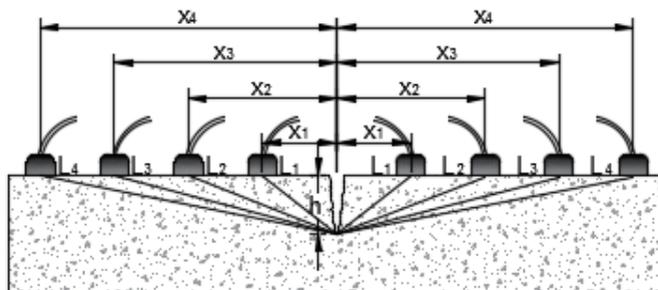
$$T_i = \frac{2L_i}{V} \quad (\text{Equação 2.14})$$

em que T_i é o tempo de pulso medido com os transdutores a uma distância x_i da fissura; V é a velocidade de pulso do ultrassom; e L_i é a metade da distância de propagação correspondente ao T_i e que depende de x_i e h . Sendo assim substitui-se o valor de L_i com relação à h e x_i na equação 2.14 e obtém-se:

$$X_i^2 = V^2 \frac{T_i^2}{4} - h^2 \quad (\text{Equação 2.15})$$

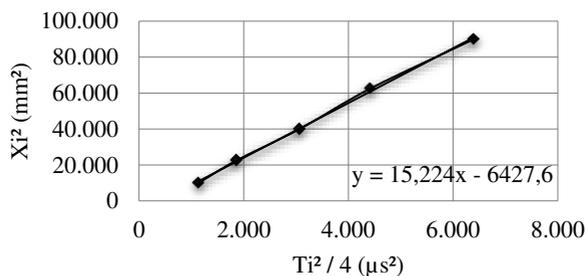
Esta equação indica uma relação linear entre os parâmetros X_i^2 e T_i^2 . Ao se plotar os resultados, verifica-se que a inclinação da melhor reta é numericamente igual ao quadrado da velocidade de pulso e que a interseção da reta com o eixo y (coeficiente linear) é numericamente igual ao quadrado do valor da profundidade da fissura. O cálculo para o estudo prévio realizado com um prisma de concreto de dimensões de 80 x 20 x 15 cm com uma fenda induzida de 76 mm gerou o gráfico ilustrado na Figura 2.21 que apresenta a reta calculada e a sua respectiva equação.

Figura 2.20 - Medida da profundidade de fissura – Método “A”.



Fonte: Adaptado de Pinto *et al.* (2010).

Figura 2.21- Apresentação da melhor reta com base nos valores calculados pelo ensaio ($X_i^2 \times T_i^2 / 4$) utilizando o Método A.

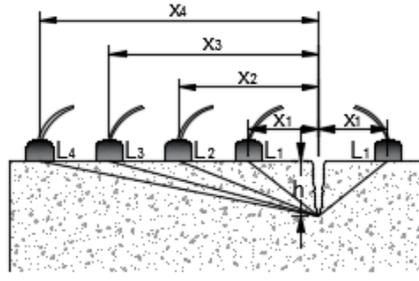


Fonte: Autor.

Método “B” – Pinto *et al.* (2010)

O Método “B” é uma variação do Método “A” sendo aplicado para situações em que a fissura se encontra próxima a um dos lados da peça estrutural. O processo é similar ao cálculo da velocidade indireta, de modo que o transdutor emissor é fixado de um lado da abertura e o receptor é disposto em diversas posições do outro lado da fissura, conforme Figura 2.22.

Figura 2.22 - Medida da profundidade da Fissura – Método “B”.



Fonte: Adaptado de Pinto *et al.* (2010).

A primeira posição deve ter os transdutores equidistantes à fissura enquanto que nas outras posições a distância sofre incrementos fixos. Em cada posição obtém-se o tempo de pulso o qual é utilizado na Equação 2.16.

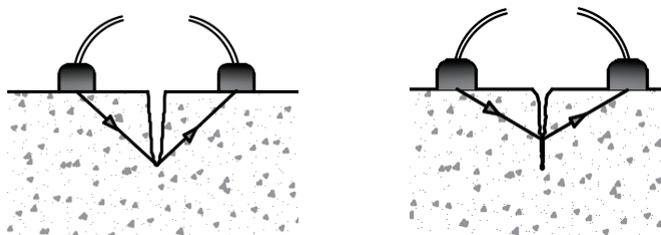
$$X_i^2 = V^2 \left(T_i - \frac{T_1}{2} \right)^2 - h^2 \quad (\text{Equação 2.16})$$

Os experimentos de Pinto *et al.* (2010) mostraram que as duas técnicas propostas foram capazes de estimar o valor da profundidade de fendas induzidas com um erro inferior a 10% e com maior precisão se comparado à técnica de Bungey e a BS 1881.

No entanto deve-se atentar para algumas limitações existentes nos processos de detecção de fissuras baseados no tempo de propagação da onda, como em estruturas de concreto sujeitas à carregamentos externos. Em tais situações a geometria do dano muitas vezes é irregular e parcialmente fechada e com isso o caminho percorrido pela onda pode ser inferior ao trajeto que seria realizado pela ponta da fissura podendo levar à difíceis interpretações do valor de profundidade encontrado. Nesse contexto Kee e Zhu (2014) mostraram que ensaios não destrutivos que utilizam o tempo de propagação da onda ultrassônica para detecção de fissuras podem gerar resultados não confiáveis em regiões muito fechadas pois a primeira onda a ser detectada não será mais a onda difratada pela ponta da fissura, sendo mais provável que seja a onda proveniente da região de interface da fissura. Além disso, o estudo constatou que o valor da menor espessura de fissura pela qual as ondas de tensão não são transmitidas é 0,08 mm, ou seja, quando a distância entre o vazio é inferior a esse valor (situações de fissuras parcialmente fechadas ou

conectadas por poeira / produtos da carbonatação, por exemplo) o processo de detecção fica passível de erros. A Figura 2.23 ilustra o trajeto da onda para a situação de duas fissuras com mesma profundidade, mas com espessuras diferentes.

Figura 2.23 - Trajeto da onda para uma fissura aberta (à esq.) e para uma fissura parcialmente fechada (à dir.).



Fonte: Adaptado de Kee e Zhu (2014).

Ressalta-se que nesta pesquisa as fendas induzidas possuem geometrias retangulares com aberturas superiores à 0,08 mm.

2.2.9. Análise do formato do sinal propagado pelo ultrassom para avaliação de danos

De acordo com Carelli (2014), pesquisas vêm sendo desenvolvidas a fim de mostrar que o uso da velocidade do pulso ultrassônico para detecção de danos no material é limitado a diversos fatores. Parâmetros como a dispersão da onda e a atenuação provaram ser mais sensíveis aos danos do que a tradicional velocidade de pulso, podendo servir de incremento ao uso da técnica in-situ (AGGELIS, 2011). Atualmente, o formato do sinal é visível na maioria dos equipamentos de ultrassonografia do concreto e que, com o uso da análise do comportamento da onda, pode-se obter parâmetros mais sensíveis para caracterizar o elemento estrutural (SHIOTANI e AGGELIS, 2009), tais como a velocidade de grupo, a amplitude máxima, a amplitude pico-a-pico e a energia transmitida (CARELLI, 2014). Como a velocidade de pulso é a característica da componente de energia mais rápida (transita pelo caminho mais curto) considera-se que tal parâmetro não leva em conta o restante da energia do sinal.

Afim de compreender os resultados encontrados em cada sinal é preciso analisar os fatores que interferem no formato da onda ultrassônica. A natureza não homogênea do concreto, que consiste de

cimento, água, agregados miúdo e graúdo além de adições e bolhas de ar, faz com que o sinal perca intensidade conforme atravessa o meio de modo que a composição do concreto produz efeitos diversos de atenuação (redução das amplitudes) no sinal transmitido (PHILIPPIDIS e AGGELIS, 2005). Além disso, estudos têm mostrado que o comportamento da onda ultrassônica possui forte dependência na dispersão, ou seja, no desvio da onda em diferentes direções os quais na maioria das vezes não coincidem com a onda incidente (SHIOTANI e AGGELIS, 2009).

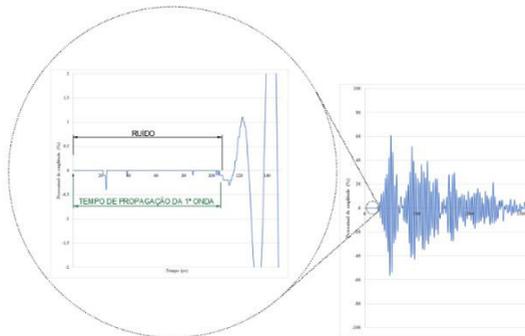
De acordo com Owino e Jacobs (1999) a atenuação do material pode ser classificada em intrínseca (absorção) ou extrínseca (dispersão) sendo que a atenuação inclui a influência dos dois efeitos. O primeiro ocorre em virtude da fricção interna devido ao trabalho gerado na interface dos materiais e o segundo constitui de um processo de alta complexidade, que depende da dimensão dos dispersores, da quantidade desses por volume, além de suas propriedades acústicas em relação ao material.

A seguir serão descritos alguns parâmetros de análise do formato da onda.

2.2.9.1. Tempo de propagação

O tempo de propagação da primeira onda do sinal é detectado pelo aparelho de ultrassom quando a maior amplitude de ruído é registrada, conforme demonstra a Figura 2.24. Este tempo utilizado no cálculo da velocidade de pulso é indicado no painel do equipamento.

Figura 2.24 - Destaque da primeira onda do sinal ultrassônico em uma amostra de concreto utilizando o arranjo indireto.



Fonte: Autor.

2.2.9.2. Energia do Sinal

Um sinal é um conjunto de dados ou informações, os quais são funções da variável independente tempo ou espaço (LATHI, 2007). De acordo com o autor, a energia do sinal pode ser calculada de duas maneiras; a primeira considera a área abaixo do sinal retificado (valores negativos de amplitude transformados em positivos) do envelope de ondas, conforme Equação 2.17:

$$EA = \int_0^{t_i} |A(t)| dt \quad (\text{Equação 2.17})$$

A outra forma considera a energia como a área abaixo das amplitudes elevadas ao quadrado, conforme a Equação 2.18.

$$EA = \int_0^{t_i} A(t)^2 dt \quad (\text{Equação 2.18})$$

onde

EA = Energia do sinal;

A(t) = Amplitude do sinal em função do tempo;

t_i = Intervalo de tempo definido para a análise.

Salienta-se que a medida da “energia” é um indicativo da capacidade de energia do sinal, não a energia real (sentido convencional) e, portanto, não valem os conceitos de conservação da energia, por exemplo. A razão é que essa medida não depende apenas do sinal, mas também de outros fatores que influenciam os dados de entrada (LATHI, 2007).

No caso do ultrassom, pode-se citar como um fator que influencia no sinal o acoplamento dos transdutores. De acordo com o ACI 228 (2013) o uso da atenuação do sinal como um indicador de qualidade do concreto pode ser utilizado para as análises, porém é necessário um cuidado especial para garantir que o acoplamento dos transdutores seja consistente nas posições de teste. Conforme mencionado por Carelli (2014) a variabilidade dos resultados do formato de onda, ocorre em especial, devido ao acoplamento, que mantido de forma manual, está sujeito a variações. Hofmann (2015) comenta que a força aplicada nos transdutores e a quantidade de material acoplante são intervenientes no sinal ultrassônico. Philippidis e Aggelis (2005) anotam que os efeitos aleatórios do acoplamento podem ser reduzidos quando as medições são realizadas pelo mesmo operador seguindo os mesmos procedimentos

durante todo o experimento, mas ressaltam que o acoplamento nunca será idêntico nos ensaios realizados de forma manual de modo a ter-se sempre uma variação da energia. Para minimizar o efeito do acoplamento dos transdutores, nesta pesquisa fez-se uso de pressões constantes nos transdutores, com o uso de pesos pré-definidos, conforme será descrito no Capítulo 3.

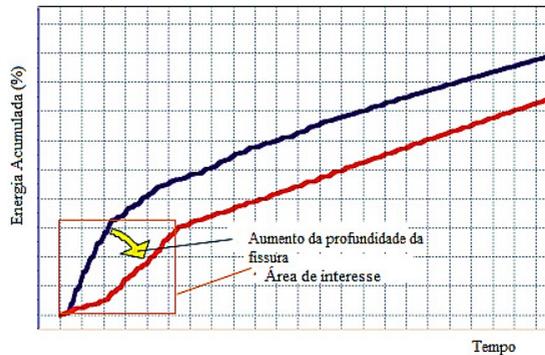
Com relação a unidade da medida de “energia” do sinal, essa é dependente da natureza do sinal transmitido e, portanto, ao contrário da energia convencional, não possui o Joule como unidade de energia (unidade padrão de energia definida pelo sistema internacional). Para o caso do ultrassom, os sinais são de tensão e, deste modo, possuem unidades de volts-segundo (V.s) ou volts quadrados-segundo (V².s), dependendo da forma de cálculo.

Neste trabalho, a “energia do sinal” sempre fará referência aos valores calculados pela Equação 2.17. A razão do uso dessa equação se dá pelo estudo de Hofmann (2015) que verificou que para a análise do sinal ultrassônico, a equação que leva em consideração apenas o sinal retificado (Equação 2.17), apresentou menor variação dos resultados em torno da média, em relação à equação que eleva a amplitude ao quadrado (Equação 2.18) ainda que essa tenha sido mais sensível.

2.2.9.3. Energia acumulada

Este parâmetro utiliza os valores da energia acumulada ao longo do tempo, conforme apresenta a Figura 2.25. A curva superior no gráfico representa o acúmulo de energia para uma superfície em boas condições, já a curva inferior apresenta a energia acumulada para uma leitura contornando uma fissura (KRÜGER, 2005). Segundo o autor, o aumento da profundidade da fissura reduz a energia acumulada medida e pode servir como um indicativo de qualidade do concreto. Além disto, o autor menciona que na região de interesse, em destaque na Figura 2.25, as inclinações iniciais referem-se às condições da fissura, de modo que menores inclinações indicam um aumento da profundidade da fissura.

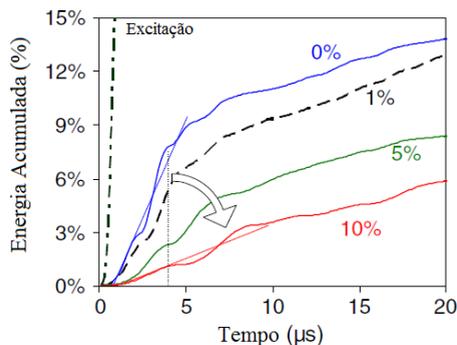
Figura 2.25 - Energia Acumulada para uma amostra sã (azul) e fissurada (vermelho).



Fonte: Krüger (2005).

Shiotani e Aggelis (2009) também analisaram esse parâmetro em argamassas com diferentes quantidades de vazios artificiais, conforme ilustrado na Figura 2.26.

Figura 2.26 - Energia Acumulada para diferentes percentuais de vazios em argamassas.



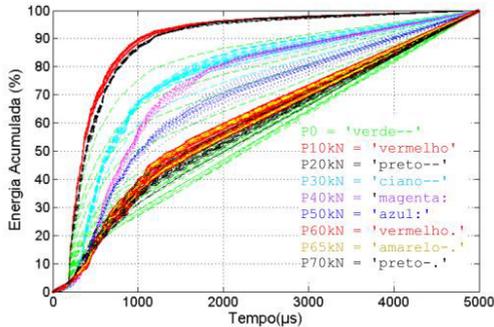
Fonte: Shiotani e Aggelis (2009).

Foi verificado que a medida que se aumentava o percentual de vazios induzidos na argamassa, menores foram os acúmulos de energia no início do sinal. Isso se deve ao fato que uma argamassa sã tende a apresentar os primeiros ciclos mais fortes e conseqüentemente, é registrado um maior incremento de amplitude nos primeiros microssegundos ao se comparar as argamassas com mais falhas. A partir disso, os autores afirmam que a parcela inicial das curvas sofre bastante influência dos danos existentes.

2.2.9.4. Janelas de tempo

As janelas de tempo estão relacionadas ao tempo necessário para o acúmulo de um percentual de energia, sendo informações extraídas do gráfico de energia acumulada. Conforme apresentado nas Figuras 2.25 e 2.26, a energia acumulada no início do sinal em peças com mais fissuras ou vazios possui uma inclinação menor que em peças íntegras devido a uma maior atenuação na chegada das primeiras amplitudes. Sendo assim, o tempo para o acúmulo do mesmo percentual de energia para as peças danificadas tende a ser maior e, com isso, pode permitir uma análise gráfica, conforme ilustra a Figura 2.27.

Figura 2.27 - Energia Acumulada para diferentes níveis de carga em uma viga de concreto armado.



Fonte: Hofmann (2015).

A Figura 2.27 refere-se ao estudo de Hofmann (2015) em que uma viga de concreto armado foi submetida ao ensaio de flexão a quatro pontos e a cada acréscimo de carga ocorreu a leitura ultrassônica pelo modo indireto com os transdutores de 200 kHz. Pôde-se observar que conforme se aumenta a carga, e conseqüentemente o nível de fissuração, menores são as inclinações das curvas, o que evidencia uma maior atenuação para um mesmo percentual de energia. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 2.2, em que é possível visualizar uma tendência no acréscimo do tempo em função de um maior nível de carga de modo que cada coluna representa o tempo para o acúmulo de 25%, 50%, 75% e 90% da energia total do sinal.

Tabela 2.2 - Acréscimo do tempo para acumular um determinado percentual de energia em função do nível de carga.

Carga (kN)	T25 (μs)	T50 (μs)	T75 (μs)	T90 (μs)
P0	-	-	-	-
P10	252	411	755	995
P20	264	431	739	1.335
P30	463	751	1.607	3.434
P40	569	943	1.767	3.425
P50	612	1.039	2.461	3.98
P60	615	1.274	3.243	3.989
P70	664	1.647	3.321	4.325

Fonte: Hofmann (2015).

De acordo com Shiotani e Aggelis (2009) uma outra forma utilizada para quantificar o atraso da chegada da energia é o tempo para obtenção do centroide do sinal retificado (Tempo central - TC), que pode ser calculado por meio da Equação 2.19.

$$TC = \frac{\int_0^{t_i} (|A(t)| \cdot t) dt}{\int_0^{t_i} |A(t)| dt} \quad (\text{Equação 2.19})$$

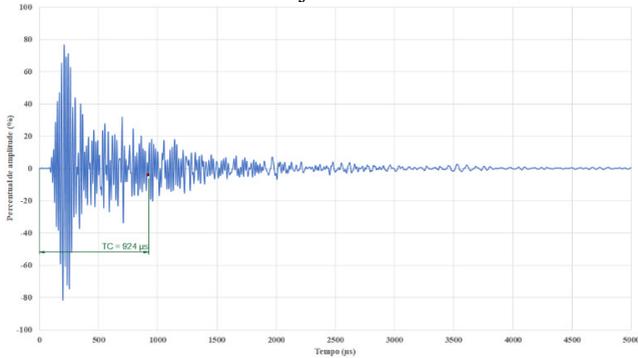
onde

A(t) = Amplitude do sinal em função do tempo;

t_i = Intervalo de tempo definido para a análise.

A Figura 2.28 apresenta um exemplo em que o TC foi calculado em um sinal ultrassônico obtido em uma amostra de concreto.

Figura 2.28: Indicação do parâmetro TC obtido no sinal ultrassônico em uma amostra de concreto utilizando o arranjo indireto.



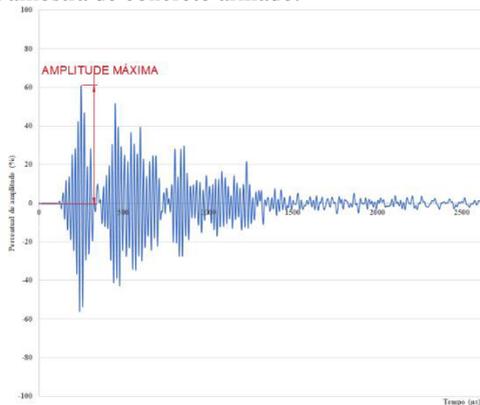
Fonte: Autor.

2.2.9.5. Amplitude máxima

De acordo com Aggelis e Paipetis (2012) a amplitude é um indicativo do grau de atenuação e dispersão do material. Esse parâmetro está relacionado a energia do sinal e pode ser de grande utilidade, haja vista que mudanças na microestrutura do material estão, em geral, diretamente relacionadas com a eficiência da transmissão da energia.

A amplitude máxima, ilustrada na Figura 2.29, é o valor absoluto do maior pico existente no formato da onda como um todo ou em um grupo específico de análise (um intervalo).

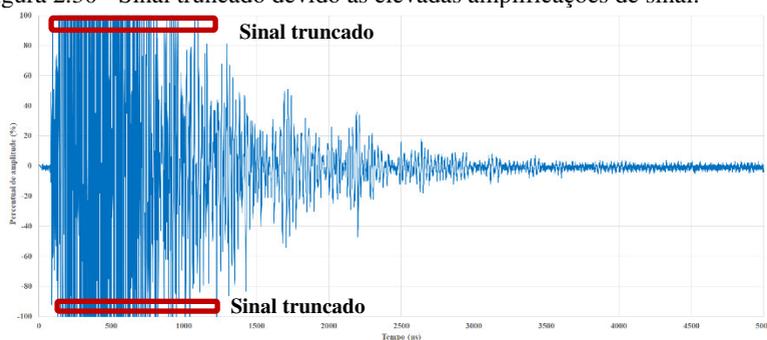
Figura 2.29 - Amplitude máxima de um sinal ultrassônico obtido pelo arranjo indireto em uma amostra de concreto armado.



Fonte: Autor.

Deve-se atentar para que se evite elevações demasiadas dos ganhos do sinal (amplificação das amplitudes do sinal pelo sistema), conforme apresenta a Figura 2.30 no intervalo de tempo de 0 μ s a 1000 μ s, especificadamente. Em situações com esse formato de onda, ocorre o truncamento do sinal e não se torna possível uma análise eficaz deste, tendo em vista que a maior parte dos valores das amplitudes atingem o valor máximo e, por conseguinte as análises comparativas geram valores muito conservadores, haja vista que a área da onda seria maior caso não houvesse o truncamento.

Figura 2.30 - Sinal truncado devido às elevadas amplificações de sinal.



Fonte: Autor.

2.2.10. Estudos com uso dos parâmetros do sinal ultrassônico para avaliação de fissuras, danos e técnicas de reparo

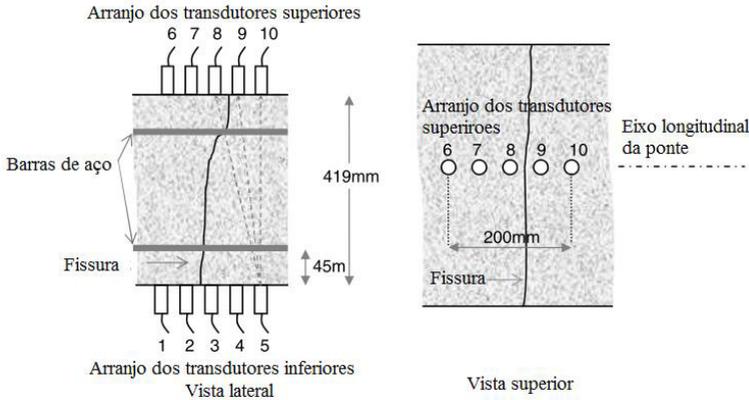
2.2.10.1. Aggelis e Shiotani (2007)

O estudo teve como objetivo a avaliação da eficácia do reparo de uma fissura em uma ponte de concreto após a injeção de epóxi em que foram utilizadas ondas longitudinais e Rayleigh antes e após a execução do reparo.

A abertura da fissura era de 0,2 mm sendo transversal à plataforma, o que permitiu a identificação visual da profundidade da fissura. Para o reparo, fez-se uso do sistema epóxi a fim de unir o concreto em ambas as faces e impedir o acesso de agentes degradantes. A densidade do sistema epóxi escolhido foi de 1,15 g/cm³ e o módulo de elasticidade de 1 GPa.

O arranjo do experimento pode ser visualizado na Figura 2.31. A distância entre os transdutores foi de 50 mm e esses foram acoplados utilizando cera derretida.

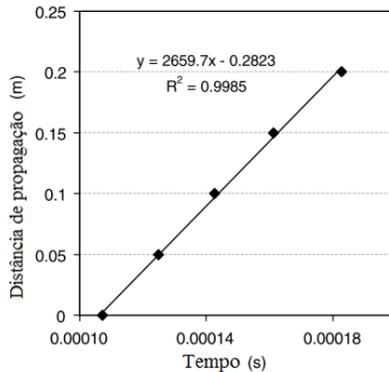
Figura 2.31 - Representação esquemática do arranjo dos sensores.



Fonte: (Aggelis *et al.*, 2009).

Primeiramente foi realizado o uso das ondas superficiais e assim sendo, as leituras foram realizadas apenas em uma superfície. A Figura 2.32 apresenta a correlação entre a distância de propagação da onda até o transdutor receptor e o seu respectivo tempo para o concreto sem fissura. O objetivo dessa correlação foi servir como referência para a análise de resultados antes e após o reparo.

Figura 2.32 - Correlação entre a distância e o tempo de chegada da onda Rayleigh para um concreto íntegro.

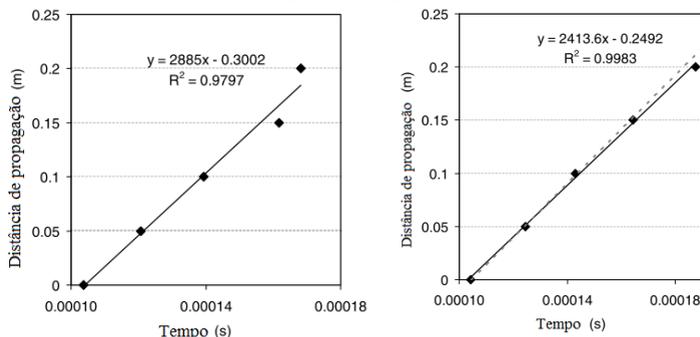


Fonte: Aggelis e Shiotani (2007).

A Figura 2.33 apresenta a correlação antes e após o reparo. É possível verificar que os valores após o reparo atingem uma boa

aproximação com o valor de referência. A redução da velocidade de 2659 m/s para 2413 m/s foi atribuída a zona de fratura existente próxima a fissura.

Figura 2.33 - Correlação entre a distância e o tempo de chegada da onda Rayleigh para um concreto antes do reparo (à esquerda) e após o reparo (à direita).

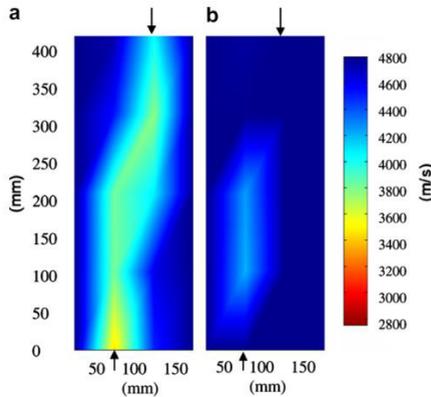


Fonte: Aggelis e Shiotani (2007).

Os autores consideraram que houve um preenchimento eficaz com base na velocidade. O mesmo procedimento foi realizado no lado oposto, e como a velocidade medida após o reparo ficou próxima do valor encontrado com o concreto são, confirmou-se a efetividade da terapia. Neste caso teve-se acesso aos dois lados e foi possível efetuar a medição nas duas superfícies, no entanto nos casos em que só se tem acesso à uma face de leitura, o uso apenas dos resultados da velocidade não é um parâmetro confiável para a avaliação do preenchimento. Além disso, as ondas de Rayleigh trazem apenas informações próximas da superfície.

Para complementar a avaliação do preenchimento completo no tratamento da fissura fez-se uso da técnica de tomografia ultrassônica, por meio da combinação de 50 caminhos de onda tanto perpendiculares quanto diagonais. Utilizou-se sensores R6 com frequência até 100 kHz e um sistema multicanal de aquisição de dados PAC DISP. Na Figura 2.34 pode-se observar a tomografia da seção transversal antes e após a aplicação do tratamento com epóxi e fica evidente que a técnica foi capaz de detectar a fissura e a eficácia do preenchimento. No concreto reparado verifica-se ainda a existência de alguns pontos de menor qualidade, o que se atribui as zonas de fratura.

Figura 2.34 - Tomogramas a) antes e b) após a recuperação da fissura. As setas indicam a posição real de aberturas da fissura.



Fonte: Aggelis e Shiotani (2007).

Ao se comparar o uso de frequência de transmissão de 10 kHz e 100 kHz, os autores constataram que a propagação em maiores frequências é mais sensível ao dano do que em baixas frequências pois para a primeira frequência a diferença de velocidade entre o concreto íntegro e o concreto fissurado foi de 270 m/s já para a frequência de 100 kHz a diferença de velocidade foi de 710 m/s e sendo assim, é mais apropriada para a avaliação de reparos, entretanto é necessário considerar a atenuação que em elevadas frequências pode tornar a aquisição no campo inviável.

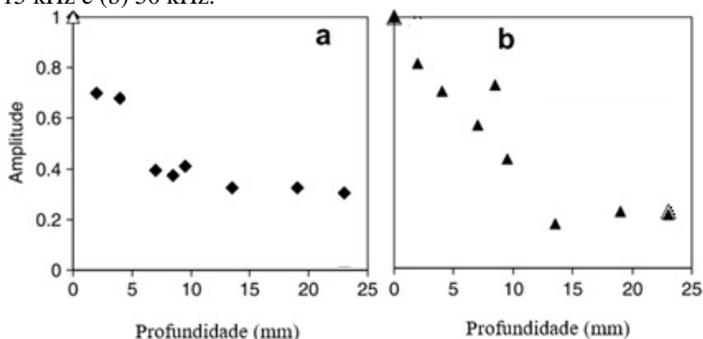
Neste trabalho os autores utilizaram apenas o parâmetro da velocidade, no entanto mencionam que o uso de parâmetros relacionados à energia torna a análise mais sensível melhor representando o estado da peça estrutural. Um ponto interessante foi o uso de uma região íntegra do concreto como referência para uma boa recuperação da viga pois permite a comparação em campo da efetividade do preenchimento da resina.

2.2.10.2. Aggelis, Shiotani e Polyzos (2009)

O experimento utilizou dois corpos-de-prova de dimensões 150 x 150 x 500 mm em que após 28 dias da moldagem foram realizados 8 cortes com espessuras de 4 mm e diferentes profundidades (2, 4, 7, 8,5, 9,5, 13,5 19 e 23 mm) na direção longitudinal da peça. O experimento fez uso de leituras indiretas com transdutores de 50 kHz e 115 kHz.

Os autores verificaram que existe uma relação entre a amplitude do sinal recebido com a profundidade do vazio, conforme apresenta a Figura 2.35.

Figura 2.35 - Amplitude x Profundidade utilizando transdutores de frequência de: (a) 115 kHz e (b) 50 kHz.



Fonte: Aggelis *et al.* (2009).

A análise experimental com o transdutor de 115 kHz mostra que a partir de uma determinada profundidade, o valor da amplitude torna-se estável e próximo de 0,3. Ao se efetuar o ensaio com a frequência de transmissão de 50 kHz, pôde-se verificar que os valores da amplitude até a profundidade de 9,5 mm foram superiores se comparados aos resultados encontrados com a outra frequência e isso se deve a maior espessura de penetração atingida com a frequência de 50 kHz (devido ao maior comprimento de onda) e, portanto, mais energia é propagada sob a abertura.

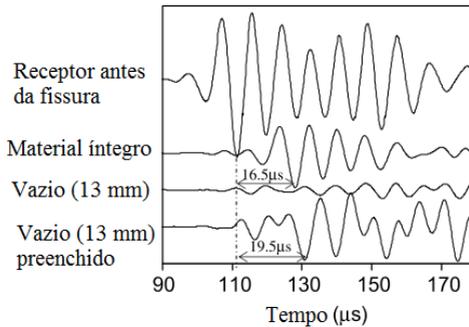
Os valores constantes da amplitude se devem às atenuações existentes em função dos maiores valores de profundidade que em alguns casos pode não ser corretamente determinada pelo modo de leitura indireto; além disso, as ondas de Rayleigh atingem profundidades próximas ao seu comprimento de onda e, portanto, a energia que passa sob a fissura é muitas vezes insignificante, e desta forma, em fissuras maiores não são apresentadas maiores discrepâncias.

A fim de analisar a influência do epóxi na transferência de energia, foi realizado o preenchimento completo de duas fendas, com profundidade de 13,5 mm e verificou-se que o aumento da amplitude do sinal chegou a níveis próximos ao do concreto íntegro. Com relação a velocidade, verificou-se que essa foi 16% menor que a medida no

concreto e isso fora atribuído tanto ao menor módulo do sistema epóxi (no caso, 1 GPa) quanto as zonas de fratura próximas das fendas.

A tendência observada pelos autores, conforme Figura 2.36 é que se um reparo for bem efetuado e o preenchimento da fissura for completo, a amplitude e o formato do sinal devem ser similares a uma medida de referência efetuada no concreto íntegro. Por outro lado, se a amplitude não for elevada e similar ao material são, implica-se em uma deficiência no preenchimento do sistema de tratamento no interior da fissura.

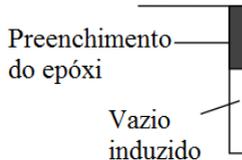
Figura 2.36 - Formato do sinal para diferentes condições do concreto.



Fonte: (Aggelis *et al.*, 2009).

Com base nisso, para verificar a sensibilidade do ensaio perante fendas semipreenchidas, foi realizada a aplicação de epóxi em diferentes proporções nas fendas com profundidade de 19 mm e 23 mm, conforme Figura 2.37.

Figura 2.37 - Representação de um preenchimento parcial.

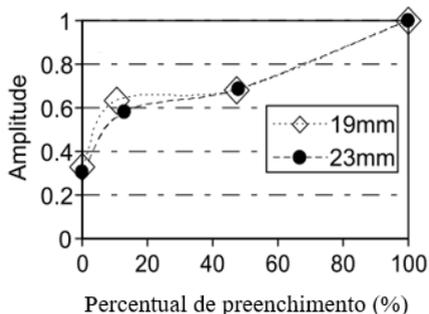


Fonte: Aggelis *et al.* (2009).

Foram realizadas leituras com o transdutor de 115 kHz obtendo-se os resultados apresentados na Figura 2.38. Percebe-se que um preenchimento próximo a borda da fissura gera um incremento substancial na amplitude, de forma que se pode atribuir esse aumento, tanto à onda de Rayleigh quanto às ondas longitudinais e transversais que

atravessam a camada de epóxi. A Figura 2.38 indica que a amplitude se mostrou um parâmetro sensível para caracterizar o reparo, já que houve um claro incremento no seu valor em função do percentual de preenchimento.

Figura 2.38 - Amplitude x percentual de preenchimento com epóxi em diferentes profundidades.



Fonte: (Aggelis *et al.*, 2009).

O estudo apresentou a eficiência do uso do parâmetro da amplitude para a detecção de diferentes percentuais de preenchimento com epóxi em fissuras no concreto e além disso verificou-se que o formato do sinal em um material íntegro pôde ser utilizado como referência para comparação com o sinal de uma fissura plenamente preenchida. Essa consideração serviu de embasamento para os ensaios realizados nesta pesquisa.

Por outro lado, a profundidade das fendas utilizadas no estudo foi de no máximo 23 mm de maneira a se fazer uso das ondas de Rayleigh e considerando que existem casos em que os danos são mais extensos, torna-se necessário verificar se o parâmetro utilizado é sensível para maiores profundidades, com o uso de ondas longitudinais, caso que será estudado nesta pesquisa.

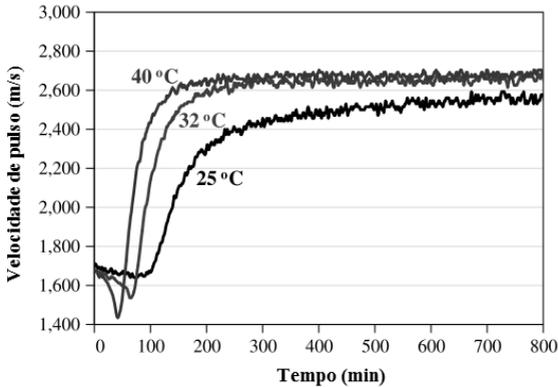
2.2.10.3. Aggelis e Paipetis (2012)

Sabe-se que eficiência da cura da resina epóxi é um fator importante para a qualidade do reparo, em especial no caso em que o polímero age na proteção de agentes degradantes bem como para reabilitação estrutural. Com base nisso, foi montado um experimento com leituras ultrassônicas contínuas por 800 minutos, de modo direto e com frequência de transmissão 500 kHz, para investigar a evolução da

polimerização do epóxi. A densidade do material era de $1,088 \text{ g/cm}^3$ e o módulo de elasticidade da resina curada possuía valor de $4,8 \text{ GPa}$.

Imediatamente após a mistura do epóxi, o material pode ser definido como um líquido viscoso e, assim sendo, é capaz de transmitir ondas longitudinais. A Figura 2.39 exibe o ganho de velocidade em função do tempo de cura para diferentes temperaturas.

Figura 2.39 - Velocidade de propagação do ultrassom x tempo de cura da resina para 3 temperaturas.

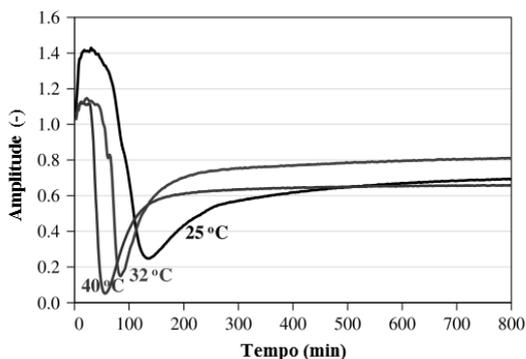


Fonte: Aggelis e Paipetis (2012).

Nos três casos, a velocidade inicial foi de 1700 m/s e nos primeiros minutos sofreu uma queda para então exibir um incremento, chegando a 2700 m/s . O material curado na temperatura de 40°C apresentou o efeito da redução e incremento de velocidade com menor tempo que os materiais curados em temperaturas mais baixas. Ademais, a cura à 40°C foi completa com tempo inferior as outras temperaturas. Após 7 dias foram realizadas novas leituras e a velocidade esteve entre 2600 e 2700 m/s , o que indica que a rigidez do polímero não mudou significativamente com o tempo.

A Figura 2.40 apresenta o ganho de amplitude para os três casos.

Figura 2.40 - Amplitude x tempo de cura da resina para 3 temperaturas.



Fonte: Aggelis e Paipetis (2012).

Todas as curvas apresentaram um comportamento similar, com um aumento inicial, seguido de uma queda. Após isso a transmissão é parcialmente recuperada e atinge valores constantes. Novamente o processo esteve relacionado com a temperatura, em que a menor amplitude ocorreu a 40°C nos primeiros 50 minutos. A amplitude da onda esteve diretamente relacionada com o aumento da atenuação do material e como o material não possui agentes dispersantes, como é o caso do concreto que possui diferentes fases, o decréscimo de amplitude foi atribuído ao aumento de viscosidade.

Considerou-se que o aumento inicial foi devido ao processo exotérmico de polimerização o qual aumenta a temperatura, tornando o líquido menos viscoso na fase inicial de nucleação da polimerização. Com o aumento da taxa de polimerização após a nucleação, a viscosidade também aumenta o que ocasiona o incremento de perda de energia do sinal propagado, manifestado pelo aumento de atenuação da amplitude da onda. Conforme o polímero é vitrificado, a eficiência da transmissão é recuperada de modo que o valor atinge ao esperado para o material curado.

O estudo mostrou que a velocidade de pulso exibiu um valor inferior no estágio polimerização da resina de epóxi ao comparar ao valor do sistema após a cura, sendo a variação de 55%. A amplitude do sinal por sua vez, que é uma medida de atenuação, esteve diretamente influenciada pela viscosidade, e apresentou uma variação de 119%.

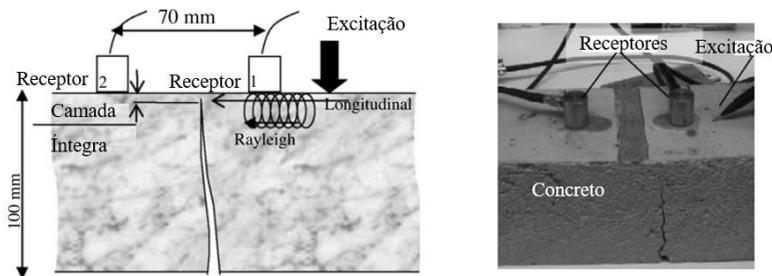
Verifica-se que a amplitude do sinal se mostrou mais sensível à cura do material em comparação à velocidade de pulso, o que enaltece a decisão pelo uso desse parâmetro nas análises realizadas nesta pesquisa.

Além disso, observou-se que a viscosidade do material está ligada a atenuação do sinal e portanto, dado a elevada quantidade de resinas epóxi disponíveis no mercado, torna-se interessante a verificação da resposta do sinal para resinas de diferentes viscosidades, assunto que será tratado nesta pesquisa.

2.2.10.4. Aggelis, Leonidou e Matikas (2012)

Nesse estudo prismas de concreto foram moldados e posteriormente fissurados por meio de esforços de flexão de modo que as fissuras surgiram no sentido da base para o topo dos prismas sem a separação completa da peça. As dimensões dos espécimes eram de 400 x 100 x 100 mm e o concreto foi reforçado com fibras de aço. As leituras ultrassônicas foram realizadas apenas na face de compressão do prisma, ou seja, na superfície visualmente íntegra e foram analisadas experimentalmente as ondas longitudinais e de Rayleigh além de ter sido realizada uma simulação numérica com o *software Wave 2000*. Os transdutores possuíam frequência de transmissão de 60 kHz (modelo PAC R6) e diâmetro de 15 mm, sendo ambos receptores da excitação externa provocada na superfície do prisma, conforme Figura 2.41.

Figura 2.41 - Configuração do ensaio para leituras em uma superfície (à esquerda) e foto do experimento em laboratório (à direita).

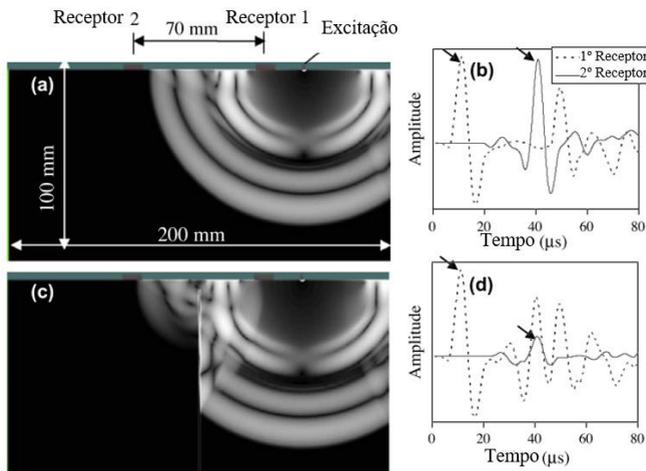


Fonte: Aggelis, Leonidou e Matikas (2012).

Por meio da análise experimental, os autores verificaram que houve uma redução de 25% no valor da velocidade da onda ao se comparar a peça fissurada com a peça íntegra, já o parâmetro da amplitude do sinal apresentou uma maior sensibilidade ao dano obtendo uma redução de 90%.

Com relação à simulação numérica, foram calculados os valores de velocidade e amplitude para fissuras com diferentes distancias iniciais da superfície (60, mm, 40 mm, 20 mm, 10 mm, 8 mm, 5mm, 3 mm e 1 mm). Verificou-se que para danos iniciando a 1 mm da superfície, a redução no valor da velocidade das ondas longitudinais foi de 2% e para a distância de 3 mm da superfície não existiu influência na velocidade o que mostra que esse parâmetro caracteriza apenas a porção próxima da superfície com concreto íntegro, constatação também realizada na pesquisa de Medeiros (2007). Por outro lado, o parâmetro da amplitude se apresentou sensível para diversas profundidades simuladas. A Figura 2.42 apresenta a simulação realizada para a visualização do sinal transmitido para o corpo-de-prova íntegro (a) e para o corpo-de-prova com dano iniciando a distância de 3 mm da superfície e também os respectivos formatos da onda (b) e (d). Pode-se verificar que o formato da onda do primeiro receptor (posicionado antes do dano) é bastante similar para os dois casos, já o formato do segundo receptor (posicionado após o dano) possui uma considerável redução no valor da amplitude.

Figura 2.42: (a) e (c) imagem do campo do sinal transmitido com o uso da simulação numérica e em (b) e (d) o respectivo formato do sinal.



Fonte: Aggelis, Leonidou e Matikas (2012).

Ao se efetuar uma analogia da região íntegra de concreto com o preenchimento parcial de epóxi (apenas na superfície) tem-se fortes indícios que o parâmetro da amplitude do sinal possa providenciar

resultados sensíveis para as diferentes proporções de preenchimentos com o epóxi.

2.2.10.5. Tsangouri *et al.* (2015)

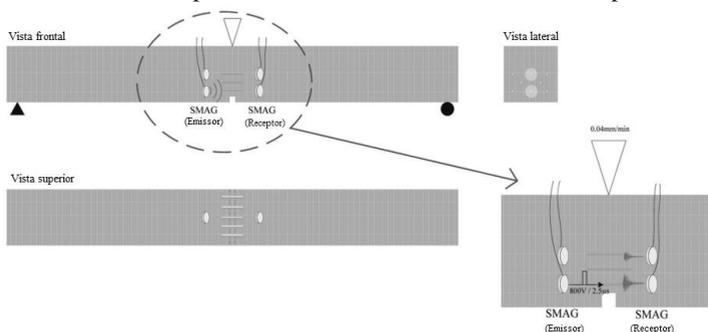
Este estudo apresenta uma alternativa que pode ser utilizada, tanto para o tratamento de danos, quanto para a verificação do preenchimento do agente de reparo da peça estrutural. A técnica utiliza a cura autônoma das fissuras com cápsulas de vidro que ao serem rompidas pela movimentação da viga, causada pelo dano, liberam o material para recuperar a continuidade da peça estrutural. A verificação do preenchimento foi executada por meio de transdutores imersos no concreto que monitoraram continuamente as alterações internas da peça.

Os corpos-de-prova foram vigas de concreto com dimensões de 840 mm x 100 mm x 100 mm em que foi realizada a aplicação de carga com o ensaios de flexão à 3 pontos. Para favorecer a formação da fissura no centro do prisma, foi executado um dano com 10 mm de profundidade. Durante a moldagem dos prismas, foram posicionadas cápsulas tubulares (com altura de 50 mm e diâmetro de 3 mm) com adesivos a base de poliuretano nas regiões onde se tinha expectativa do surgimento das fissuras.

Dois ensaios de flexão foram executados de modo que primeiramente a amostra íntegra foi carregada sob uma taxa de deflexão de 0,04 mm/min, até uma abertura de fissura de 0,3 mm, momento em que as capsulas são rompidas e liberam o agente de cura; após 24 h de cura do produto, as vigas foram recarregadas e a recuperação devido ao tratamento é avaliada em função da resistência, rigidez, velocidade de propagação do sinal e amplitude.

Transdutores SMAG (Smart aggregate) foram utilizados, conforme Figura 2.43;

Figura 2.43 - Vistas do posicionamento dos transdutores e das cápsulas de vidro.



Fonte: Tsangouri *et al.* (2015)

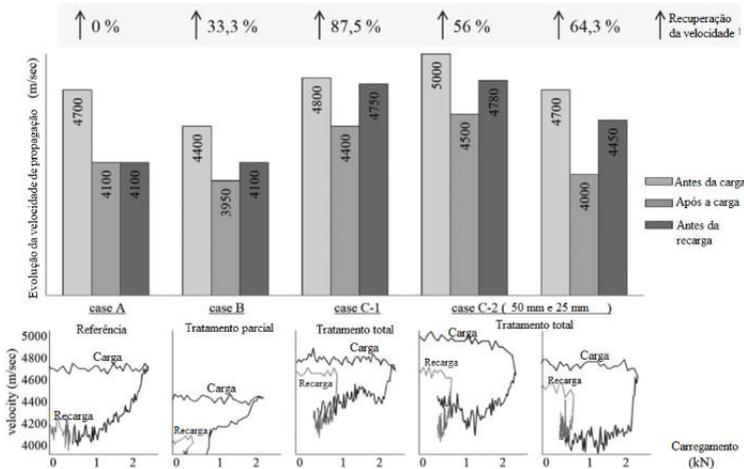
Os transdutores emitirão ondas de compressão em que se espera que a alteração do sinal seja proporcional à abertura/fechamento da fissura assim como em função do tratamento. Ao total foram analisados 5 casos:

- Caso A: Amostra com cápsula de tratamento vazia e transdutores à 35 mm da base da viga, que serviu como medida de referência;
- Caso B: Amostra com cápsula contendo material insuficiente para preencher a fissura e transdutores posicionados à 35 mm da base da viga;
- Caso C1: Amostra com cápsula contendo material suficiente para preencher a fissura e transdutores posicionados à 35 mm da base da viga;
- Caso C2: Amostra com cápsula contendo material suficiente para preencher a fissura e transdutores posicionados à 25 e 50 mm da base da viga;

A análise com base na velocidade de propagação do sinal foi realizada com o cálculo do parâmetro antes do carregamento, após o carregamento e antes da recarga, situação em que o adesivo já estava aplicado e curado.

O que se pode observar, conforme Figura 2.44, é que para o Caso A, a recuperação da velocidade foi de 0%, como já era suposto, já que não houve tratamento; para o Caso B, a recuperação foi de 33%, em função do preenchimento parcial e para os Casos C1 e C2 a recuperação chegou à 87,5%, pois o preenchimento foi total. A recuperação de 100% não era esperada pois, de acordo com os autores existem diferenças na rigidez entre o concreto e o agente de tratamento.

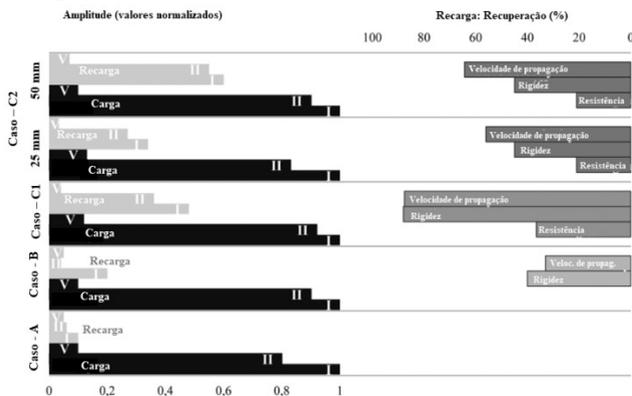
Figura 2.44 – Alteração da velocidade de propagação para cada caso estudado antes e após o carregamento e após o reparo.



Fonte: Tsangouri *et al.* (2015)

Os autores comentam que o uso apenas da velocidade de propagação não garante uma completa interpretação da condição das amostras e, portanto, as análises também foram realizadas com relação ao formato da onda por meio do parâmetro da amplitude. Ao se analisar tal parâmetro verifica-se que conforme se aumentou o carregamento até a fissuração da viga, a amplitude reduziu 90% em relação ao valor do concreto íntegro e após o tratamento, o valor do parâmetro chegou à 60% do valor da amostra sã, para o caso C2 e em torno de 20% do concreto íntegro para o tratamento parcial (Caso B), o que indica uma sensibilidade para a detecção de tratamentos parciais e plenos. Pode-se observar que existe uma relação entre a amplitude, a velocidade de propagação e a rigidez da peça estrutural (Figura 2.45). Além disso, para o Caso B, além da recuperação da velocidade e da amplitude, houve uma recuperação de 40% da rigidez e de 0% da resistência, já para os casos C1 e C2, a recuperação da rigidez chegou à 88% e da resistência em 36,5%, o que mostra o efeito do tratamento completo em relação ao tratamento parcial; esses valores foram obtidos por meio das curvas carga x abertura de fissuras, que mediram a condição das vigas durante o ensaio.

Figura 2.45 - Relação entre a amplitude, a velocidade de propagação, a resistência e a rigidez da peça estrutural



Fonte: Tsangouri *et al.* (2015)

I – Carregamento em estágio inicial – deformação com comportamento elástico;

II – Carregamento com deformação não linear, início da microfissuração;

V – A resistência ao carregamento cessa e a abertura das fissuras aumenta.

O estudo mostrou uma alternativa tanto para o tratamento de fissuras quanto para a verificação da qualidade do reparo. Novamente a amplitude mostrou-se um parâmetro sensível para a verificação de preenchimentos parciais e além disso, pode-se constatar que um reparo parcial não satisfaz a recuperação da resistência da peça além da rigidez ser inferior à obtida com um pleno preenchimento.

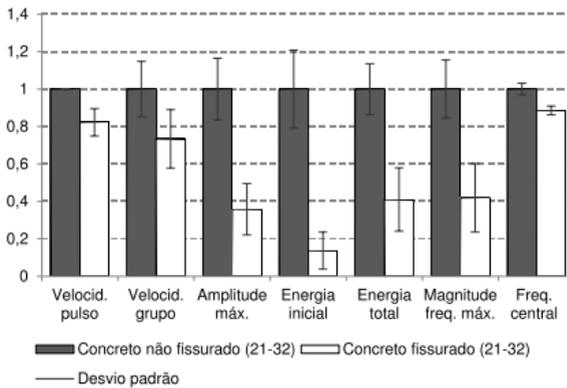
2.2.10.6. Carelli (2014)

O estudo propôs verificar quais parâmetros associados à propagação do sinal ultrassônico são mais sensíveis aos danos em elementos de concreto e argamassa. Para isso foram induzidas fissuras de retração plástica em placas de concreto e argamassa e também foram moldadas vigas de concreto armado para análise da resposta dos parâmetros mediante aos esforços de flexão. Utilizou-se o aparelho de ultrassom Pundit Lab+ com os transdutores de frequência de transmissão de 200 kHz.

Nove parâmetros foram analisados: velocidade de pulso, velocidade de grupo, amplitude máxima, energia inicial, energia total, energia acumulada, magnitude de frequência, frequência máxima e frequência central.

A autora verificou que os parâmetros de energia, apresentaram resultados sensíveis para a análise da fissuração das placas. A Figura 2.46 permite a visualização da sensibilidade dos diferentes parâmetros, em que é possível identificar os parâmetros de energia como os mais sensíveis.

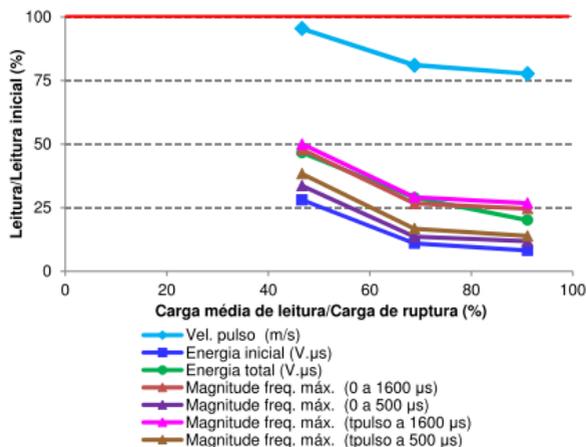
Figura 2.46 - Comparação entre os parâmetros sensíveis nas placas de concreto são e fissurado.



Fonte: Carelli (2014).

No caso das fissuras de flexão nas vigas, o parâmetro de energia também esteve entre os mais sensíveis, conforme apresenta a Figura 2.47. A velocidade de pulso apresentou redução de apenas 5%, que, dada a variabilidade do ensaio de ultrassom, não pôde ser caracterizada como sensível à fissuração. Os outros parâmetros utilizados exibiram quedas maiores a 50%, atingindo 72% de redução apontada pela energia inicial.

Figura 2.47 - Comparação entre os parâmetros para a viga de concreto armado sob esforços de flexão.



Fonte: Carelli (2014).

A autora constata que, em geral, a sensibilidade obtida pelos parâmetros do formato da onda de ultrassom, foi significativamente maior do que a da velocidade de pulso, o que demonstra a importância da análise do formato do sinal para uma avaliação mais precisa e eficiente do estado de fissuração do elemento.

2.2.10.7. Hofmann (2015)

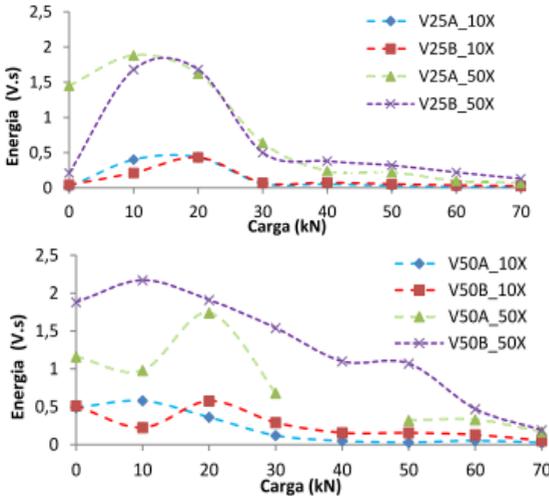
A pesquisa teve como objetivo o estudo do parâmetro da energia do sinal ultrassônico para detecção de fissuras além do uso de um programa computacional análise dos formatos de onda.

A análise utilizou duas equações para os cálculos da energia (Equação 2.17 e 2.18) em que foi verificado que a equação que considera apenas o sinal retificado obteve menor sensibilidade para detecção de fissuras, mas também menor coeficiente de variação. Além disso o estudo mostrou que ao se utilizar um ganho de sinal em que ocorre o truncamento das amplitudes, ainda que o coeficiente de variação seja menor, os resultados apresentam uma menor sensibilidade em relação aos ganhos menores, em que o truncamento não ocorre.

O estudo de autor mostrou que o parâmetro da energia apresenta sensibilidade e potencial para uso na avaliação e detecção de fissuras em elementos de concreto das mais variadas dimensões. Conforme observa-se na Figura 2.48, a tendência é de redução no valor de energia ao se

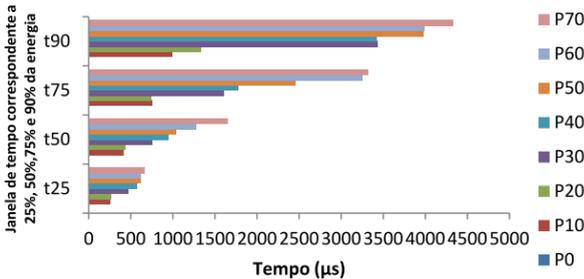
aumentar o carregamento nas vigas e conseqüentemente a fissuração dessas. Ao se analisar as janelas de tempo (Figura 2.49), verifica-se que o aumento das cargas nas vigas provoca uma redução no tempo para o acúmulo de um percentual da energia total do sinal (25%, 50%, 75% e 90%).

Figura 2.48 – Curvas de energia total em função do carregamento.



Fonte: Hoffman (2015).

Figura 2.49 Comparativo das janelas de tempo para diferentes cargas.



Fonte: Hoffman (2015).

A pesquisa serviu de embasamento para a escolha da equação a ser utilizada no presente estudo, bem como mostrou que além dos valores absolutos de energia do sinal, os tempos para obtenção de um percentual

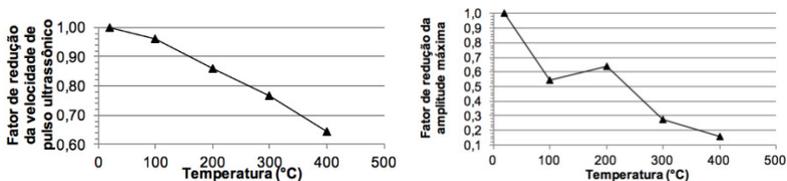
de energia são interferidos com base na condição da peça estrutural, com destaque para o T75 e T90, de forma a fornecer informações importantes podendo ser também um parâmetro de análise.

2.2.10.8. Viana (2017)

O estudo da autora teve como objetivo avaliar a influência de altas temperaturas no concreto, por meio da análise dos parâmetros associados ao sinal ultrassônico. Foram utilizados corpos-de-prova de dimensões 10 x 30 cm os quais foram aquecidos à temperaturas de 100 °C 200 °C 300 °C e 400°C.

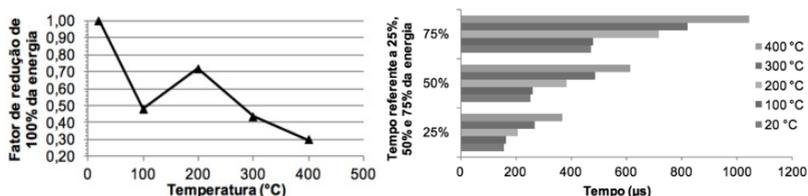
Com a pesquisa pode-se verificar que a velocidade de propagação do pulso ultrassônico, a amplitude máxima, a energia do sinal, as janelas de tempo e a energia acumulada foram parâmetros que se mostraram sensíveis ao acréscimo de temperatura. As Figuras 2.50 a 2.52 apresentam os resultados obtidos para cada um dos parâmetros.

Figura 2.50 – Redução da velocidade de propagação do sinal (à esq.) e da amplitude máxima (à dir.) em função da temperatura.



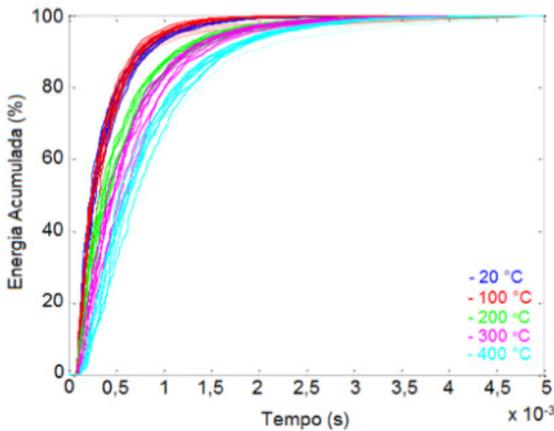
Fonte: Viana (2017).

Figura 2.51 – Redução da energia (à esq.) e aumento do tempo para acúmulo de um percentual de energia (à dir.) em função da temperatura.



Fonte: Viana (2017).

Figura 2.52 – Energia acumulada em corpos-de-prova de concreto para as diferentes temperaturas.



Fonte: Viana (2017).

A pesquisa reforça o uso dos parâmetros relacionados ao sinal para análise da condição interna do concreto mediante a aplicação de danos, neste caso, relacionados às fissuras que surgem conforme se eleva a temperatura externa. Ficou clara a contribuição para a verificação da qualidade do material com a utilização de diversos parâmetros do sinal ultrassônico o que fortifica o uso desses em paralelo com a análise da velocidade de propagação.

2.2.11. Considerações finais sobre o capítulo

Tendo-se como base o bom desempenho do parâmetro da energia/amplitude na detecção de fissuras e danos por meio de uma melhor caracterização da peça fissurada e tratada, e dando continuidade aos estudos do GPEND, têm-se fortes indícios que análise dos parâmetros de energia para investigar o comportamento dos sinais em situações de reparo com epóxi possa trazer valiosas contribuições para análises do preenchimento das fendas.

O Quadro 2.2 a seguir apresenta os resumos das pesquisas utilizadas como respaldo para o desenvolvimento do programa experimental do presente estudo.

Quadro 2.2: Resumo dos estudos realizados.

Autores	Estudo	Parâmetros associados ao formato do sinal	Resultados / Contribuições
Aggelis e Shiotani (2007)	Uso da Tomografia ultrassônica antes e após o reparo com epóxi em uma fissura existente em uma ponte.	Vel. Pulso com análise por imagem (tomograma)	Para as diferentes combinações de posições de leitura, verificou-se que ocorreu um aumento na velocidade de propagação do sinal por meio da análise por imagem e, portanto, considerou-se o reparo como satisfatório. Os valores encontrados para o concreto íntegro e para o tratado foram próximos.
Aggelis, Shiotani e Polyzos (2009)	Prismas de concreto com fendas superficiais de diferentes profundidades.	Amplitude do sinal	A amplitude do sinal de um concreto íntegro foi similar à de um concreto com a fenda completamente preenchida pelo epóxi. Fissuras parcialmente preenchidas apresentaram valores de amplitude dentro do intervalo de valores para o concreto fissurado e são.
Aggelis e Paipetis (2012)	Leituras ultrassônicas contínuas por 800 minutos, para investigar a evolução da polimerização do epóxi.	Vel. Pulso e amplitude do sinal	Tanto a velocidade de propagação quanto a amplitude apresentaram-se sensíveis à cura do epóxi com destaque para o segundo parâmetro que esteve diretamente influenciado pela viscosidade, e apresentou uma variação de 119%, superior à variação da velocidade.

<p>Aggelis, Leonidou, Matikas (2012)</p>	<p>Prismas de concreto reforçados com fibras de aço fissurados por meio de esforços de flexão. Uso do ultrassom e simulações numéricas em amostras de diferentes profundidades de dano</p>	<p>Vel. Pulso e amplitude do sinal</p>	<p>Sensibilidade superior do parâmetro da amplitude em relação à velocidade. Com relação a simulação numérica, verificou-se que para danos iniciando abaixo de 3 mm da superfície, a velocidade de pulso não detectou. Por outro lado, a amplitude se apresentou sensível para as diferentes profundidades simuladas.</p>
<p>Tsangouri <i>et al.</i> (2015)</p>	<p>Vigas de concreto submetidas ao ensaio de flexão à 3 pontos. O tratamento foi realizado por meio de cápsulas internas à peça e o monitoramento foi executado com o uso de transdutores imersos no concreto.</p>	<p>Vel. Pulso e amplitude do sinal</p>	<p>Alternativa para o tratamento e monitoramento da terapia de modo que tanto a velocidade de propagação quanto a amplitude apresentaram-se sensíveis às condições das vigas (sem preenchimento e com preenchimento parcial e total).</p>
<p>Carelli (2014)</p>	<p>Indução de fissuras de retração plástica em placas de concreto e argamassa e vigas de concreto armado submetidas à ensaios de carga</p>	<p>Vel. Pulso, Vel. Grupo, Amplitude, Energia inicial, total e acumulada, Freq. Máx, total e magnitude.</p>	<p>A sensibilidade obtida pelos parâmetros do formato da onda de ultrassom ao se comparar peças sãs e fissuradas, foi significativamente maior do que a sensibilidade da velocidade de propagação da onda.</p>

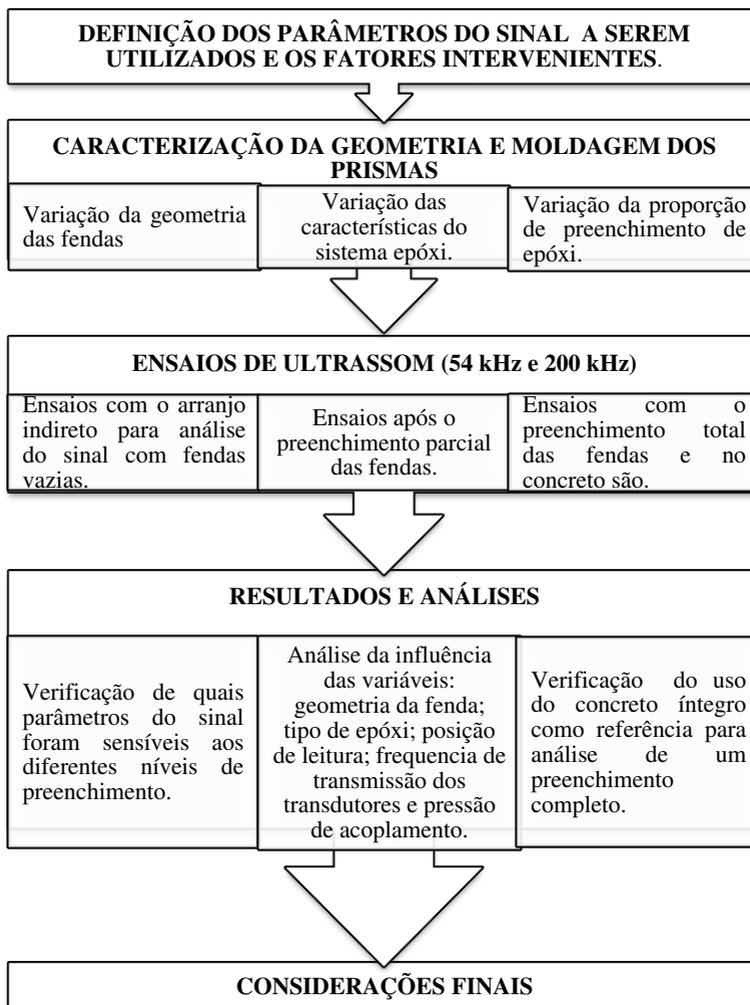
Hofmann (2015)	Vigas de concreto armado submetidas à ensaios de carga	Vel. Pulso, Vel. Grupo, Amplitude, Energia total e acumulada,	O parâmetro da energia apresenta sensibilidade e potencial para uso na avaliação e detecção de fissuras em elementos de concreto das mais variadas dimensões.
Viana (2017)	Corpos-de-prova de cilíndricos aquecidos a temperaturas de 100 °C 200 °C 300 °C e 400°C.	Vel. Pulso, Vel. Grupo, Amplitude, Energia total e acumulada	A velocidade de propagação do pulso ultrassônico, a amplitude máxima, a energia do sinal, as janelas de tempo e a energia acumulada foram parâmetros que se mostraram sensíveis aos danos causados pelo acréscimo de temperatura.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para atingir os objetivos propostos, a pesquisa fez uso de um programa experimental realizado com auxílio dos equipamentos do Grupo de Pesquisas em Ensaio Não-Destrutivos (GPEND), do Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) e do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), todos situados na UFSC.

Os procedimentos utilizados no desenvolvimento do trabalho encontram-se na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma com as etapas da pesquisa.

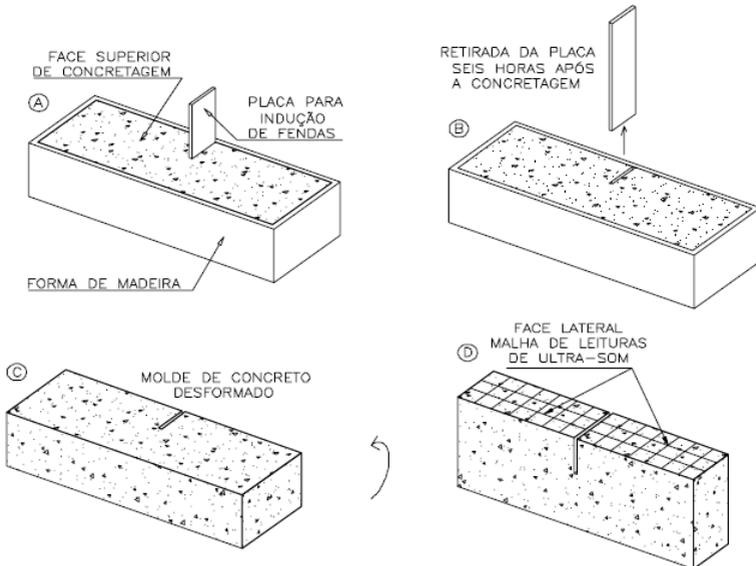


3.1. GEOMETRIA DOS PRISMAS E FENDAS

Elaborou-se duas séries de prismas de concreto com fendas superficiais induzidas, de forma que fora alvo de variação a abertura e profundidade da fenda, o tipo de epóxi aplicado (3 diferentes viscosidades) e o percentual de produto aplicado.

A indução das fendas foi realizada conforme proposto por Medeiros (2007), e está ilustrado o procedimento na Figura 3.2. Após a moldagem dos prismas, foi realizada uma rotação de 90° desses, a fim de que a fenda simulada ficasse na face superior de maneira a permitir a realização das leituras ultrassônicas pelo modo indireto, o que induz a onda a contornar o vazio criado. Cabe ressaltar que devido à rotação, a superfície em que se farão as leituras com o ultrassom encontra-se em uma altura intermediária à do lançamento do concreto, sofrendo menor influência da exsudação.

Figura 3.2 - Procedimento para indução das fendas superficiais nos prismas de concreto.



Fonte: Medeiros (2007).

Os valores de aberturas das fendas foram de $\omega = 3$ mm e 20 mm e os valores de profundidades de $h = 25$ mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm, 150

mm e 220 mm. A indução de fendas foi realizada com papelão revestido com fita plástica adesiva (3 mm) e madeira (20 mm). Ao total foram moldados 15 prismas, mas no trabalho foram utilizados 14, pois o prisma com $\omega = 3$ mm e $h = 100$ mm rompeu durante sua movimentação.

Com relação à geometria dos prismas, para evitar interferências das dimensões dos prismas de concreto, fixou-se o valor do comprimento em 80 cm, dimensão mínima necessária para efetuar seis leituras com o modo indireto, distanciadas de 100, 150, 200, 250, 300 e 350 mm da fenda; o valor da largura foi fixo em 20 cm e o da altura ficou fixo em 15 cm, com exceção dos casos em que a fenda possuía profundidade de 150 e 220 mm, em que a altura do prisma foi de 30 cm e a largura de 15 cm.

A Série 1 fixou o valor da abertura em $\omega = 3$ mm e variou os valores das profundidades em $h = 25$ mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm, 150 mm e 220 mm, com o objetivo de estudar a influência da profundidade da fenda na propagação do sinal. Foram moldados doze prismas de concreto, sendo dois para cada profundidade, a fim de que se utilizasse o epóxi com características diferentes em concretos com condições similares.

A Série 2 possui três prismas e teve como intuito a verificação da influência de uma maior abertura da fenda ($\omega = 20$ mm) com três profundidades ($h = 50$ mm, 75 mm e 100 mm) além de um sistema epóxi de maior viscosidade que os utilizados na série anterior.

O Quadro 3.1 apresenta um resumo das variáveis, relacionadas aos prismas, que serão analisadas neste programa experimental e o Quadro 3.2 exibe as características dos espécimes que foram utilizados no estudo.

Quadro 3.1 - Resumo das variáveis analisadas para as análises.

Fatores	Faixa de variação	Objeto da verificação
Abertura (mm)	$\omega = 3 / 20$	A interferência da espessura das fendas.
Profundidade (mm)	$h = 25 / 50 / 75 / 100 / 150 / 220$	A interferência das profundidades das fendas.
Impedância acústica do epóxi (10^6 kg/m ² s)	2,56 / 2,76 / 4,8	A influência da impedância acústica das resinas.
Percentual de preenchimento resina epóxi	33 / 66 / 100	A alteração dos valores dos parâmetros do sinal e relacioná-los com a condição do prisma

Quadro 3.2: Características dos prismas utilizados na pesquisa.

Séries	L x A x C ¹ (cm)	Quantidade de prismas	h ² induzido (mm)	ω ³ induzido (mm)	Identificação ⁴
Série 1	20 x 15 x 80	2	25	3	S1 - 25 - 3 - A S1 - 25 - 3 - B
	20 x 15 x 80	2	50	3	S1 - 50 - 3 - A S1 - 50 - 3 - B
	20 x 15 x 80	2	75	3	S1 - 75 - 3 - A S1 - 75 - 3 - B
	20 x 15 x 80	2	100	3	S1 - 100 - 3 - A S1 - 100 - 3 - B ⁵
	15 x 30 x 80	2	150	3	S1 - 150 - 3 - A S1 - 150 - 3 - B
	15 x 30 x 80	2	220	3	S1 - 220 - 3 - A S1 - 220 - 3 - B
Série 2	20 x 15 x 80	1	50	20	S2 - 50 - 20 - C
	20 x 15 x 80	1	75	20	S2 - 75 - 20 - C
	20 x 15 x 80	1	100	20	S2 - 100 - 20 - C

¹ Largura x Altura x Comprimento.

² h indica a profundidade da fenda.

³ ω indica a abertura da fenda.

⁴ A identificação do prisma contempla a série, a profundidade da fenda em milímetros, a abertura da fenda em milímetros e o tipo de epóxi, sendo o epóxi A (Masterinject 190), o epóxi B (Sikadur 43) e o epóxi C (Concressive 227) conforme Anexo A.

⁵ O prisma rompeu em uma movimentação da peça e foi descartado.

3.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.2.1. Equipamento de Ultrassom

O equipamento utilizado na pesquisa foi o PUNDIT Lab+ (Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester) o qual pertence ao GPEND da Universidade Federal de Santa Catarina (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Aparelho PUNDIT Lab+ com os transdutores de 54 kHz e 200 kHz.



Fonte: Autor.

O aparelho possui 2 pares de transdutores, um com frequência de transmissão/recepção de 54kHz e diâmetro de 48 mm e outro de frequência de 200 kHz e diâmetro de 20 mm. O acoplamento acústico adequado aos transdutores é realizado pelo contato externo do aparelho com a superfície do concreto, em que se utiliza uma fina camada de pasta de acoplamento entre o transdutor e a superfície do concreto.

A vantagem desse equipamento é a visualização e exportação dos dados do sinal de cada leitura, por meio do Software de análise Pundit Link, que permite a posterior avaliação do comportamento das ondas. As amplitudes da onda exibidas pelo aparelho são dadas como a porcentagem da tensão de pulso utilizada, e o tempo de chegada do pulso é determinado automaticamente.

A amplitude adotada foi de 500 V e o tempo de exibição da curva de onda foi de 5ms. Essas configurações são as mesmas utilizadas nos trabalhos de Carelli (2014) e Hoffman (2015) e possibilitam uma melhor visualização dos sinais. O aparelho permite a escolha de diversos valores de ganhos de sinal (1x, 2x, 5x, 10x, 20x, 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x) e a opção selecionada deve ser a que apresenta valores de amplitude dentro do intervalo de 0 e 100% para que não ocorra o truncamento do sinal. O truncamento, conforme relatado por Carelli (2014) e Hoffman (2015) reduz a sensibilidade para detecção das alterações internas no concreto e, portanto, por ser função do ganho de sinal adotado além do tipo de transdutor e do dano existente, durante os ensaios analisou-se o ganho que melhor representou o caso estudado e que evitou a ocorrência de amplitudes que extrapolaram o valor de 100%.

Os parâmetros utilizados para a análise foram: tempo de propagação da primeira onda, amplitude máxima, energia total, energia acumulada e as janelas de tempo T25, T50, T75 e TC, de modo que todos encontram-se no domínio do tempo.

3.2.2. Materiais: composição do concreto

Os prismas de concreto foram moldados com o uso de cimento CP IV-RS-32, agregados graúdos (brita 0 e 1), agregados miúdos (areia grossa natural) e água.

3.2.2.1.Cimento

Utilizou-se o cimento CP IV-RS, com massa específica de 2,89 kg/m³. O laudo técnico com as características do cimento foi fornecido pelo fabricante e encontra-se no Anexo B.

3.2.2.2.Agregados Graúdos

Para a produção das misturas de concreto os agregados graúdos foram utilizados na proporção de 30% brita 0 (pedrisco) e 70 % de brita 1, sendo ambos de origem granítica (Figura 3.4) obtidos na cidade de Palhoça-SC e Florianópolis-SC respectivamente.

Os materiais foram armazenados em tonéis de aço de 200 Litros no interior do Laboratório de experimentação de estruturas e foram empregados na condição de seco ao ar.

Figura 3.4 - Brita 0 (à esquerda) e Brita 1 (à direita).



A caracterização dos agregados graúdos foi realizada seguindo as recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003) de modo que se obteve o $\varnothing_{\max} = 6,3$ mm e módulo de finura de 0,74 para a brita 0 e $\varnothing_{\max} = 12,5$ mm e módulo de finura de 1,90 para a brita 1. A caracterização completa dos agregados está apresentada no Apêndice A.

3.2.2.3.Agregados miúdos

Utilizou-se a areia grossa de origem natural (Figura 3.5) obtida na cidade de Palhoça-SC e assim como os agregados graúdos, armazenou-se o material em tonéis de aço. A caracterização seguiu as recomendações

da NBR NM 248 (ABNT, 2003) de modo que se obteve o $\phi_{\max} = 3,35$ mm e módulo de finura de 3,27. A caracterização completa encontra-se no Apêndice A.

Figura 3.5 – Agregado miúdo.



3.2.2.4. Água

A água utilizada na composição do concreto é potável e foi proveniente da rede de abastecimento público do município de Florianópolis.

3.2.3. Materiais: Sistema epóxi

Ao todo foram utilizados três tipos de epóxi, o MasterInject® 190, o Sikadur 43 e o Concessive® 227 poxy, denominados neste trabalho como epóxi A, B e C, respectivamente. O boletim técnico dos produtos encontra-se no Anexo A e algumas características dos materiais encontram-se na Tabela 3.1.

Os sistemas epóxi A e B possuem utilidades semelhantes, tais como o tratamento de fissuras e trincas e a recuperação do monolitismo de uma estrutura de concreto, porém o epóxi B apresenta a viscosidade e o módulo de elasticidade superiores aos do epóxi A e, portanto, fez-se o uso desses materiais na Série 1 para verificar se o sinal do ultrassom seria influenciado pelo tipo de epóxi.

O epóxi C é indicado para juntas de concretagem, ponte de aderência entre concreto antigo com novo, colagem de elementos pré-moldados, entre outras aplicações e como a viscosidade do material é elevada se comparada aos outros dois produtos, elaborou-se a Série 2 para verificar se a influência do sistema epóxi perante ao sinal ultrassônico seria alterada. Devido a maior viscosidade, utilizou-se uma abertura maior a fim de favorecer o preenchimento da resina por gravidade.

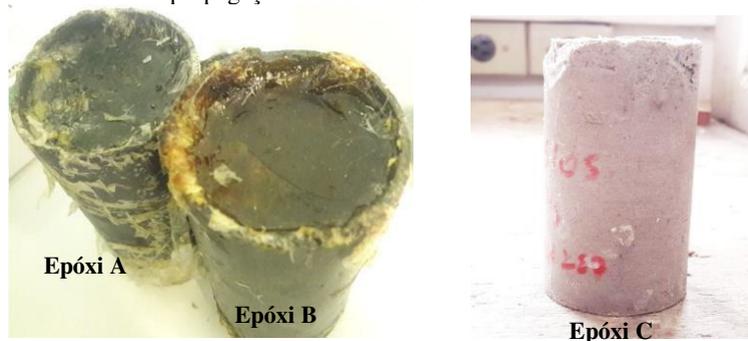
Tabela 3.1 - Características dos produtos utilizados

Características	Epóxi A	Epóxi B	Epóxi C
Viscosidade (mPa.s) (23°C)	100 - 150	500	2.750
Densidade (g/cm ³)	1,04 a 1,09	1,10	1,71
Módulo de elasticidade (Gpa)	2,20	10,60	-
Aspecto	Líquido	Líquido	Pasta
Tempo de cura	7 dias	7 dias	7 dias
Velocidade Ultrassom (m/s)*	2.459	2.513	2.808

Fonte: Boletim técnico dos produtos (Anexo A).

* A velocidade obtida foi decorrente de um ensaio de ultrassom com o modo direto, realizado com amostras moldadas em laboratório, conforme pode-se visualizar na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Amostra do Epóxi A, B e C (5 x 10 cm) utilizadas para a obtenção da velocidade de propagação com o ultrassom.



3.3. PRODUÇÃO DO CONCRETO

Com a intenção de se evitar influências da composição do concreto nas leituras do ultrassom fixou-se o valor da resistência à compressão em 25 MPa e o valor do ensaio de abatimento de tronco de cone em 8 ± 2 por serem valores de resistência comumente utilizados nas obras das edificações atuais. O traço em massa utilizado foi de 1: 2,16: 0,73: 1,70: 0,53, de modo que fora aplicado uma proporção de 30% de brita 0 e 70% de brita 1.

A Tabela 3.2 a seguir apresenta a composição por metro cúbico de concreto do traço utilizado neste estudo.

Tabela 3.2 - Composição por metro cúbico de concreto.

Materiais	Unidade	Quantidade
Cimento - CPIV-32 RS	Kg	382,1
Areia Grossa	Kg	826,7
Brita 0	Kg	279,0
Brita 1	Kg	651,0
Água	Litro	202,5

Obs: O valor do ar incorporado não foi medido.

A mistura foi realizada com o uso de uma betoneira intermitente de queda livre e eixo inclinado, com pás solidárias à cuba, volume total de 350 litros e capacidade ótima para uso de 135 litros de concreto. A sequência de colocação de materiais na betoneira seguiu a seguinte ordem: agregados graúdos, 80% da água, cimento, agregados miúdos e o restante da água.

O adensamento dos prismas foi realizado mecanicamente, com auxílio de vibrador de agulha, e os corpos-de-prova (10 x 20 cm) foram adensados manualmente, conforme as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2015).

A seguir encontram-se algumas ilustrações (Figura 3.7 e 3.8) dos prismas após o lançamento do concreto.

Figura 3.7 - Concreto fresco após o lançamento.



Figura 3.8 - Concreto fresco após o lançamento.



Ao total foram realizadas 5 betonadas para a moldagem dos 14 prismas de modo que para cada betonada foram moldados 3 corpos-de-prova. Durante as primeiras 48 horas após o lançamento e o adensamento do concreto, os prismas e os corpos-de-prova ficaram com suas formas sob uma lona plástica para se evitar a perda de água. Após isso, foi realizada a desforma dos moldes e aguardado o tempo de cura do concreto no laboratório sob temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Ao 28º dia foi realizado o rompimento dos corpos-de-prova e dado início às leituras com o ultrassom nos prismas. Os valores dos ensaios de ruptura e da velocidade de pulso encontram-se na Tabela 3.3, a seguir:

Tabela 3.3 - Valores de resistência e da velocidade de propagação nos corpos-de-prova de cada betonada.

Betonada	Velocidade (m/s)	Resistência à compressão (MPa)
1 ^a 4 prismas: Série 1	4.090	19,35
	4.008	18,92
	4.098	19,38
2 ^a 4 prismas: Série 1	4.074	19,17
	4.037	18,81
	4.086	19,56
3 ^a 2 prismas: Série 1	4.114	19,89
	4.025	19,42
	4.133	19,99
4 ^a 2 prismas: Série 1	4.167	19,72
	4.084	19,10
	4.076	19,39
5 ^a 4 prismas: Série 2	4.062	18,82
	4.125	20,05
	4.084	19,11

A média dos valores de resistência à compressão do concreto foi de 19,38 MPa e o coeficiente de variação foi de 2,08%; já o valor médio da velocidade de propagação da primeira onda dos sinais foi de 4.084 m/s e o coeficiente de variação foi de 1,02%. Sabe-se que o valor encontrado para a resistência se encontra abaixo do mínimo exigido pela NBR 6118 (ABNT, 2014) porém como no presente estudo o uso de concretos com características semelhantes para uma melhor comparação nos ensaios era mais relevante do que um determinado valor de resistência, aceitou-se os valores de resistência obtidos.

3.4. ENSAIOS COM ULTRASSOM

As leituras nos prismas foram realizadas com os transdutores de frequência de transmissão de 54 kHz e 200 kHz em que se utilizou o modo indireto de acordo com o apresentado nos Métodos A e B (PINTO *et al.*, 2010). O uso dos dois transdutores serve para comparar a sensibilidade entre ambos perante às condições impostas aos prismas. Previamente ao início das leituras, realizou-se a calibração do aparelho com a barra de transferência, conforme apresentado no subcapítulo 2.2.5 (Figura 2.10).

3.4.1. Minimização do efeito de variáveis

Inicialmente verificou-se que algumas variáveis estavam interferindo nos resultados de forma a apresentar oscilações nos tempos no mostrador digital superiores a 5% assim como no formato do sinal ultrassônico. As variáveis constadas foram: a posição de acoplamento do transdutor, a força aplicada na fixação do transdutor, a quantidade de material acoplante e a absorção do material pelo concreto, que inicialmente era um gel. Para mitigar a influência de tais variáveis, foram adotadas algumas soluções, conforme apresentadas a seguir:

3.4.1.1. Fixação da posição do transdutor

Para a realização das leituras fez-se uso de um gabarito de madeira, conforme Figuras 3.9 e 3.10, o que garantiu as mesmas posições para todas as leituras.

Figura 3.9 - Gabarito de madeira para utilização dos transdutores de 54 kHz.



Figura 3.10 - Gabarito de madeira para utilização dos transdutores de 200 kHz.



3.4.1.2. Pressão fixa aplicada pelo transdutor

A força aplicada pelas mãos do operador interfere na transmissão do sinal. Não é uma tarefa simples garantir a constância da força nos transdutores durante uma leitura e repetir a mesma pressão nas outras posições. Portanto, para minimizar tal efeito, utilizou-se anilhas de aço e células de carga com pesos conhecidos para manter a pressão constante em todas as leituras, o que possibilita uma comparação sem a influência da força exercida de operador.

Para o transdutor de 54 kHz, efetuou-se as leituras com dois pesos, 4,98 kg e 8,55 kg; como a área do transdutor é de 1810 mm² a pressão aplicada pelos transdutores no concreto foi de 0,028 N/mm² e 0,047 N/mm², respectivamente. A razão do uso de duas pressões serve para verificar se o aumento da força interfere na sensibilidade do sinal às condições dos prismas. A Figura 3.11 apresenta a pesagem das anilhas e células de carga utilizadas.

Figura 3.11 - A esquerda o peso para pressão de 0,028 N/mm² e a direita o peso acrescentado para a pressão de 0,047 N/mm².



Para o transdutor de 200 kHz, efetuou-se as leituras com o peso de 3,68kg, sendo que esse peso já considera o suporte de madeira utilizado para permitir que a anilha transfira a carga para o transdutor; como a área do transdutor é de 314,16 mm² a pressão aplicada foi de 0,117 N/mm². A Figura 3.12 apresenta a pesagem das anilhas dos suportes utilizados e a Tabela 3.4 o resumo com as pressões exercidas nos transdutores.

Figura 3.12 - A esquerda o peso utilizado para pressão no transdutor de 200 kHz e a direita o suporte de madeira para efetuar a transferência da carga.



Tabela 3.4 - Pressões exercidas nos transdutores

Transdutor (kHz)	Área (mm ²)	Peso (kg)	Pressão (N/mm ²)
54	1.810	4,98	0,028
		8,55	0,047
200	314	3,68	0,117

As Figuras 3.13 a 3.15 a seguir apresentam o esquema de leitura para o transdutor de 54 kHz e 200 kHz, respectivamente.

Figura 3.13 - Esquema de posicionamento e aplicação pressão dos transdutores de 54 kHz (pressão de $0,028 \text{ N/mm}^2$) – posição de leitura 250 mm.



Figura 3.14 - Esquema de posicionamento e aplicação da pressão dos transdutores de 54 kHz (pressão de $0,047 \text{ N/mm}^2$) - posição de leitura 250 mm.



Figura 3.15 - Esquema de posicionamento e aplicação da pressão dos transdutores de 200 kHz (pressão de $0,117 \text{ N/mm}^2$) – posição de leitura 150 mm.



3.4.1.3. Absorção de gel acoplante pelo concreto

Devido a porosidade do concreto, intensificada nesse estudo já que a resistência fora próxima de 20 MPa, o gel penetra para o interior da peça durante as leituras em uma mesma posição e desta forma os valores de tempo se tornavam menores e as amplitudes do sinal maiores conforme se repetiam as leituras. O preenchimento dos vazios pelo gel altera a condição da amostra ensaiada de modo a interferir nos resultados. Portanto, a minimização do efeito foi obtida com o uso de vaselina como material acoplante, por ser um material que é menos absorvido pelo concreto se comparado ao outro tipo de gel que estava sendo utilizado nos ensaios (gel para ultrassom, marca *Plurigel*). Além disso, as três primeiras leituras em cada posição foram descartadas, pois nessas leituras iniciais existia uma a variação dos resultados; isso se deve ao processo de saturação da superfície pelo material acoplante. A partir da quarta leitura os valores apresentam-se constantes e passíveis de uma comparação. Portanto o padrão de aquisição de dados se deu a partir da quarta leitura em cada posição.

3.4.1.4. Ganho de sinal

Para evitar interferências, durante a análise comparativa do sinal de energia fez-se uso de leituras efetivadas com o mesmo ganho. No estudo, utilizou-se os ganhos de 1x, 2x, 5x, 10x e 50x para as leituras com o transdutor de 54 kHz e ganhos de 1x, 2x, 5x, 10x, 50x e 1000x para o transdutor de 200 kHz. Sabe-se que para o estudo dos parâmetros de energia do sinal, os menores ganhos são mais eficazes pois são menos susceptíveis a ocorrência de truncamento do sinal, entretanto como inicialmente o sinal estava baixo em função da fenda optou-se por testar vários ganhos durante a etapa de preenchimento para eliminar os sinais truncados somente após as leituras com a fenda completamente preenchida.

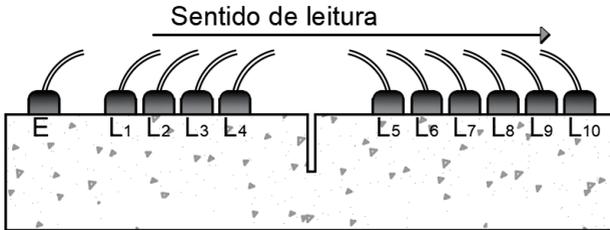
A partir da minimização dos efeitos das variáveis mencionadas foi possível obter leituras com valores mais consistentes que permitem uma melhor sensibilidade do aparelho às mudanças da geometria das fendas e da proporção do sistema epóxi.

Para cada leitura foram obtidos 14 sinais por ganho e, portanto, em cada posição obteve-se 140 sinais para o transdutor de 54 kHz (duas pressões e 5 ganhos cada) e 84 sinais para o transdutor de 200 kHz (6 ganhos). O valor de 14 sinais por ganho foi adotado inicialmente para análise da variação existente no ensaio, tendo-se como base outras

pesquisas realizadas no GPEND, tais como Carelli (2014), Hoffmann (2015) e Viana (2017).

A primeira etapa consistiu em efetuar a detecção de fenda, conforme apresentado no item 2.2.7.1 e ilustrado na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Posicionamento dos transdutores para a detecção da fenda.



Fonte: Adaptado da BS 1881 (1986).

Após a detecção fez-se uso das técnicas de estimativa da profundidade da fenda (Método A e B, BS 1881 e Bungey) e estimativa da velocidade do concreto conforme a NBR 8802 (ABNT, 2013). As combinações das posições de leitura geraram uma quantidade elevada de sinais, desta forma optou-se por utilizar as leituras de detecção da fenda e estimativa da velocidade de propagação do pulso ultrassônico no concreto apenas com o transdutor de 54 kHz e a pressão de 0,028 N/mm², pois tais técnicas são baseadas no tempo de propagação do pulso e o objetivo principal do trabalho está na análise dos parâmetros de energia.

A segunda etapa consistiu em utilizar o método que melhor estimou a profundidade das fendas para as leituras com a fenda parcialmente e plenamente preenchida, conforme subcapítulo 3.4.2.

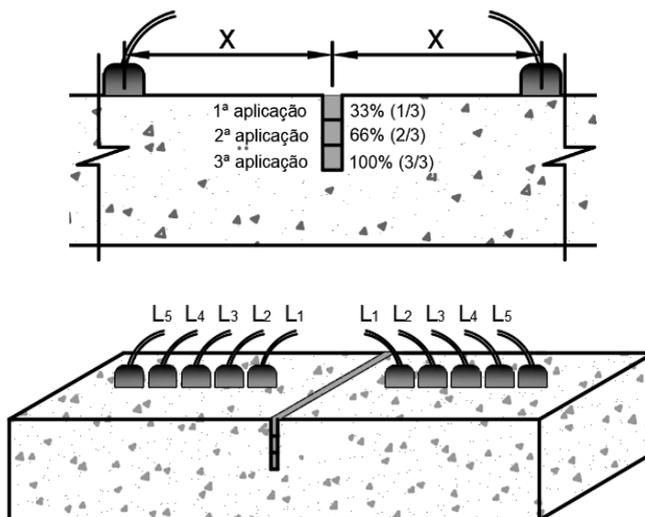
3.4.2. Preenchimento das fendas

As fendas foram preenchidas com o sistema epóxi aplicado por gravidade de modo que previamente a cada aplicação ocorreu a limpeza da fenda com ar comprimido. Para evitar o vazamento de epóxi na aplicação, foi executada a selagem das bordas. O procedimento de preparo das resinas seguiu as recomendações do fabricante e o tempo de cura entre cada aplicação foi de 7 dias.

A aplicação de resina se deu em três etapas com proporções de epóxi iguais (1/3, 2/3 e 3/3 da profundidade da fenda), com exceção do prisma em que a profundidade da fenda era de 25 mm no qual a aplicação foi na proporção de 50% e 100%.

A primeira aplicação foi realizada na superfície da fenda, para simular um reparo que atinge apenas um pequeno percentual da altura do dano e as demais aplicações foram realizadas na sequência, a fim de simular um reparo que alcança 2/3 da profundidade da fenda e o preenchimento completo. Entre cada aplicação realizou-se as leituras com o ultrassom para obtenção dos sinais, conforme Figura 3.17.

Figura 3.17 - Vista e perspectiva da ordem de aplicação do epóxi e modo de leitura com o ultrassom.

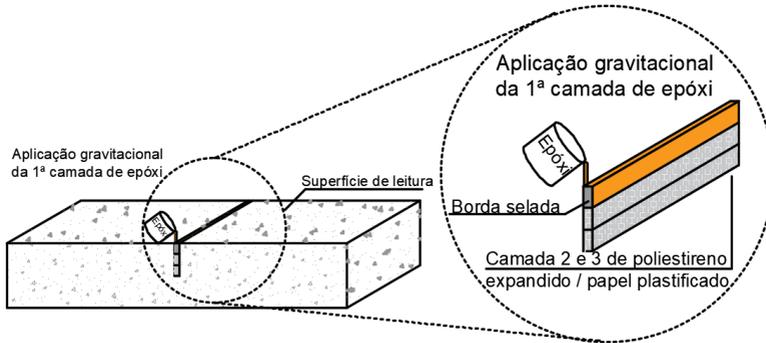


Fonte: Autor

O esquema a seguir apresenta o procedimento experimental para simulação dos preenchimentos parciais, em que se fez uso de poliestireno expandido para impedir a penetração de epóxi na fenda de abertura de 20 mm e papel revestido com plástico filme para as fendas de abertura de 3 mm.

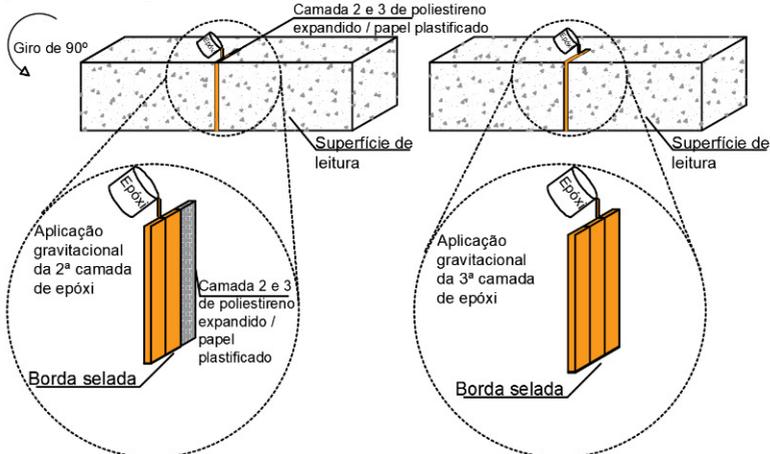
Primeiramente limpou-se a fenda com ar comprimido e em seguida aplicou-se a camada de poliestireno expandido / papel plastificado, juntamente com a selagem das bordas para garantir que a resina preencha apenas 1/3 do vazio (Figura 3.18).

Figura 3.18 - Limpeza da fenda com ar comprimido e selagem das bordas com nata de cimento.



Após a cura do material realizou-se as leituras com o ultrassom e em seguida foi realizada a segunda aplicação (Figura 3.19). A terceira aplicação seguiu o mesmo padrão da segunda.

Figura 3.19 - Segunda e terceira aplicação do epóxi.



A série de ilustrações a seguir (Figuras 3.20 a 3.23) apresenta algumas etapas executadas no programa experimental:

Figura 3.20 - Camadas 2 e 3 de poliestireno expandido na fenda de abertura de 20 mm (à esq.), camada 3 de poliestireno expandido após a primeira aplicação do epóxi (centro) e selagem das bordas para primeira aplicação da resina na fenda de 3 mm (à dir.).



Figura 3.21 - Primeira aplicação do epóxi A (à esq.) e do epóxi B (à dir.).



Figura 3.22 - Retirada da primeira camada de papel plastificado da fenda de 3 mm (à esq.). Segunda aplicação do epóxi A (centro) e fenda após a segunda aplicação (à dir.).



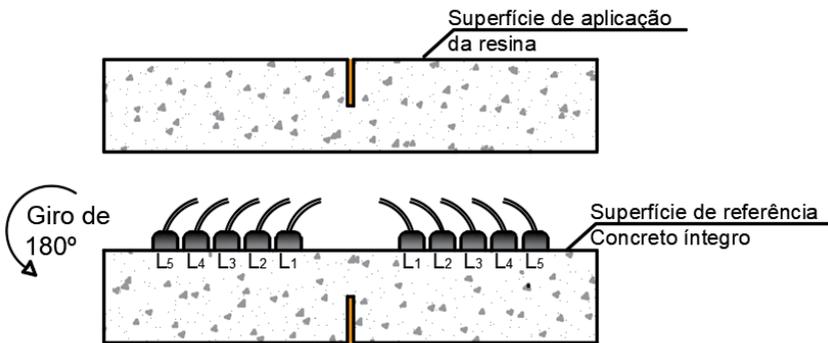
Figura 3.23 - Segunda aplicação do epóxi C na fenda de 20 mm (à esq.) e terceira aplicação do epóxi A (à dir.).



3.4.3. Leituras de referência

Por fim, foram realizadas leituras no lado oposto ao de aplicação das resinas, região com concreto íntegro (Figura 3.24), para verificar se o sinal obtido nesta região pode ser utilizado como referência para o sinal obtido na superfície onde ocorreu o preenchimento completo.

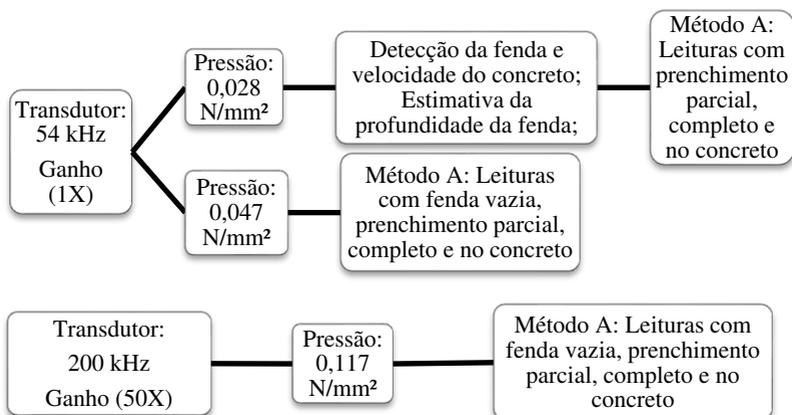
Figura 3.24 – Rotação do prisma de análise para efetuar as leituras na superfície de referência (concreto íntegro).



3.4.4. Padrão de ensaio adotado na pesquisa

O padrão de ensaios para cada prisma está ilustrado na Figura 3.25:

Figura 3.25 - Padrão de ensaios adotado na pesquisa.



Observação: O ganho de 1X para o transdutor de 54kHz e o ganho de 50X para o transdutor de 200 kHz foram os escolhidos para as análises, conforme será mencionado no Capítulo 4.

3.4.5. Processamento dos dados e parâmetros analisados

Os sinais obtidos pelo aparelho de ultrassom foram exportados em arquivos no formato .csv e transformados em .xls, para uso no software MS Office Excel. Esse software permite a utilização do modo desenvolvedor que otimiza a análise dos dados. Desta forma, desenvolveu-se uma rotina computacional para exportação dos dados obtidos.

Os parâmetros utilizados para a análise do sinal foram: tempo de propagação da primeira onda do sinal, energia total, amplitude máxima, energia acumulada e as janelas de tempo (T25, T50, T75 e TC).

A energia total foi calculada conforme Equação 2.17, mas, ao invés de se fixar uma janela temporal para o intervalo da integral, utilizou-se o instante de tempo em que o sinal acumulou 99% da energia e o 1% final fora descartado (resíduo). Considera-se que dessa forma a análise comparativa entre os sinais obtidos para diferentes percentuais de preenchimentos é mais eficaz. Como cada posição de leitura tem um sinal diferente (por vezes com mais energia no início ou no final do sinal) entende-se que ao se fixar um tempo, o sinal que acumulasse mais energia antes do tempo definido, teria mais energia e eventualmente uma parte significativa do outro sinal comparado poderia não ser considerado, por

estar após o tempo escolhido, o que pode prejudicar a interpretação das condições do prisma analisado.

Para o cálculo da energia acumulada e das janelas de tempo, utilizou-se como o primeiro ponto de acúmulo da energia, aquele calculado após o tempo de detecção da primeira onda do sinal pelo aparelho, e desta maneira, a energia do sinal acumulada no ruído foi desprezada.

A amplitude máxima foi calculada seguindo o item 2.2.8.5.

Conforme foram realizadas as aplicações de epóxi, realizaram-se as leituras com o ultrassom para aquisição dos sinais e as alterações observadas nos parâmetros foram utilizadas para verificar se existe relação com a condição de tratamento da fenda (vazia, parcialmente ou plenamente preenchida). Os critérios utilizados para verificação da detecção do preenchimento parcial serão explanados no Capítulo 5

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no programa experimental. Dividiu-se a apresentação em duas etapas sendo a primeira para os dados obtidos antes do preenchimento das fendas com epóxi e a segunda após o preenchimento.

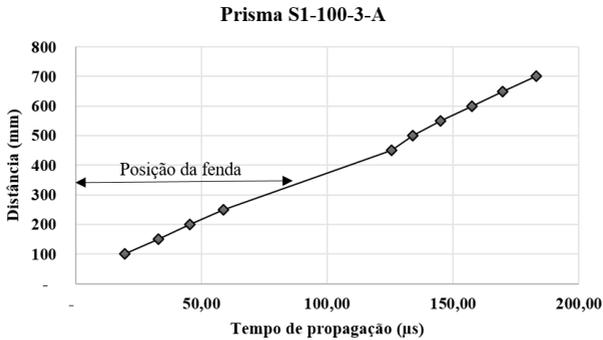
Primeiramente foi realizada a detecção das fendas induzidas para as diferentes geometrias e posteriormente se obteve a velocidade nos prismas com o arranjo indireto dos transdutores, conforme NBR 8802 (ABNT, 2013). Após isso, fez-se a estimativa da profundidade para diferentes métodos (Bungey, BS 1881, Método A e Método B).

Em seguida, executou-se a aplicação da resina nas fendas e com base no procedimento de estimativa da profundidade que obteve os melhores resultados, iniciou-se o processo de aquisição de sinais para diferentes percentuais de preenchimento de epóxi e para a superfície com concreto íntegro.

4.1. ESTUDO PRELIMINAR: DETECÇÃO DA FENDA E VELOCIDADE OBTIDA COM O MODO DE LEITURA INDIRETO

A primeira etapa para a inspeção da qualidade do concreto pode ser executada por meio da detecção de fissuras na superfície do material e também pela verificação da velocidade de propagação do sinal ultrassônico no material. Utilizou-se o gráfico ilustrado na Figura 4.1 para verificar a existência de uma fenda. O eixo das ordenadas do gráfico apresenta a distância entre o eixo do transdutor emissor (fixo) e o transdutor receptor para cada posição e o eixo das abscissas apresenta o tempo de propagação da primeira onda detectada pelo ultrassom, conforme recomenda a BS 1881 (1986). Os 4 primeiros pontos do gráfico foram obtidos com os transdutores posicionados na superfície de concreto íntegro, ou seja, antes da fenda, e os demais pontos representam as leituras com a fenda entre os transdutores. Por meio da Figura 4.1 pode-se observar que entre o 4º e o 5º ponto do gráfico existe uma redução na inclinação da reta, devido à existência de uma fenda.

Figura 4.1 - Gráfico utilizada para detecção de fenda segundo a BS 1881 (1986).



A detecção de fenda utilizando esta análise gráfica foi realizada para todos os prismas estudados de modo que conforme se aumentou a profundidade das fendas, maiores foram as alterações na inclinação da reta.

Com relação a velocidade calculada com o modo de leitura indireto do ultrassom, observa-se pela Tabela 4.1 que a média dos valores da velocidade dos prismas foi de 3.863 m/s e o coeficiente de variação foi de 2,85%.

Tabela 4.1 - Valores de velocidade de propagação indireta para cada prisma.

Série	Profundidade (mm)	Velocidade (m/s)
S1-3-A	25	3.710
	50	3.899
	75	3.920
	100	3.865
	150	3.745
	220	3.921
S1-3-B	25	3.843
	50	3.803
	75	3.962
	150	3.727
	220	4.107
S1-20-C	50	3.768
	75	3.966
	100	3.840
Média		3.863
Desvio padrão		110,0
CV		2,85%

4.2. ESTUDO PRELIMINAR: ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DAS FENDAS

Após a detecção da fenda e cálculo da velocidade de propagação indireta no concreto, o próximo passo da inspeção é estimar o valor da profundidade da fenda a fim de verificar a extensão do dano. Para isso, fez-se uso dos quatro modelos indicados na revisão bibliográfica para verificar qual procedimento encontra o valor de profundidade mais próximo do real. A Tabela 4.2 apresenta a estimativa da profundidade das fendas para os diferentes métodos de modo que foram destacados para cada prisma os valores que mais se aproximaram do real.

Tabela 4.2 - Estimativa da profundidade das fendas para os diferentes métodos.

Prisma	h real (mm)	Bungey		BS 1881		Método A		Método B	
		h' (mm)	Erro (%)	h' (mm)	Erro (%)	h' (mm)	Erro (%)	h' (mm)	Erro (%)
S1-25 3-A	25	61	142,4	42	67,3	27	8,7	30	20,1
S1-50 3-A	50	98	95,0	57	14,6	58	15,8	58	16,4
S1-75 3-A	75	124	65,9	100	33,7	74	1,3	36	108,3
S1-100 3-A	100	131	30,5	105	4,9	104	4,3	105	5,2
S1-150 3-A	150	145	3,4	158	5,4	136	10,0	195	30,2
S1-220 3-A	220	250	13,4	240	9,2	205	7,4	241	9,7
S1-25 3-B	25	72	186,3	28	10,0	24	2,4	78	211,3
S1-50 3-B	50	87	73,0	39	28,8	49	1,7	47	6,1
S1-75 3-B	75	118	57,6	87	15,4	72	4,0	87	16,2
S1-150 3-B	150	155	3,2	205	36,5	145	3,7	140	6,8
S1-220 3-B	220	258	17,3	235	6,9	208	5,9	216	2,1
S2-50 20-C	50	91	81,0	59	18,6	49	2,0	115	130,1
S2-75 -20-C	75	133	77,8	80	7,0	74	1,3	132	76,4
S2-100 20-C	100	145	45,5	134	34,2	106	5,8	137	37,2
Erro médio (%)		63,7%		20,9%		5,3%		48,3%	

¹ Profundidade estimada pelo método.

Pode-se verificar que o Método A foi o que apresentou os valores estimados mais próximos dos valores reais, com erro médio de 5,3% estando de acordo os resultados obtidos por Pinto *et. al* (2010). Desta forma, utilizou-se o padrão de leitura do Método A para a aquisição dos sinais ultrassônicos para diferentes preenchimentos com epóxi, conforme será apresentado no subcapítulo 4.3.

4.3. PREENCHIMENTO DAS FENDAS COM EPÓXI

O preenchimento das fendas foi realizado com três tipos de resina epóxi de maneira gradual, sendo as aplicações executadas em três etapas iguais (com exceção dos prismas com profundidade da fenda de 25 mm em que foram realizadas duas aplicações). Para cada aplicação de resina foi realizada a aquisição de sinais por meio do modo de leitura Método A. Para cada posição de leitura, utilizou-se duas pressões de acoplamento (0,028 N/mm² e 0,047 N/mm²) e cinco ampliações de sinal (1X, 2X, 5X, 10X, 50X) para o transdutor de 54 kHz e uma pressão de acoplamento (0,117 N/mm²) com seis ampliações de sinal (1X, 2X, 5X, 10X, 50X e 1000X) para o transdutor de 200 kHz.

4.3.1. Formato do sinal

Para exemplificar os formatos dos sinais obtidos, as Figuras 4.2 a 4.4 apresentam os sinais do prisma S1-150-3-B com os 3 padrões de leitura de forma que se relacionou o tempo de transmissão de todo o sinal com o percentual de amplitude referente a tensão de entrada (500 V). Os sinais foram sobrepostos no gráfico na ordem do mais fraco para o mais forte de maneira que cada cor representa uma condição da amostra:

- Azul: Sinal com fenda vazia (0% de resina);
- Amarelo: Sinal com fenda parcialmente preenchida (33%);
- Cinza: Sinal com fenda parcialmente preenchida (66%);
- Laranja: Sinal com fenda completamente preenchida (100%);

Figura 4.2 - Sinal ultrassônico para o prisma S1-150-3-B, Posição 100 mm, Ganho IX, Transdutor 54 kHz (0,028 N/mm²).

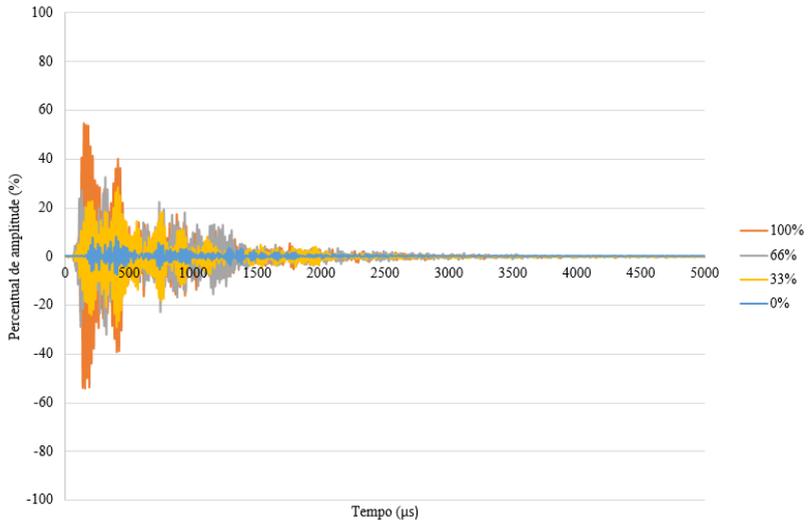


Figura 4.3 - Sinal ultrassônico para o prisma S1-150-3-B, Posição 100 mm, Ganho IX, Transdutor 54 kHz (0,047 N/mm²).

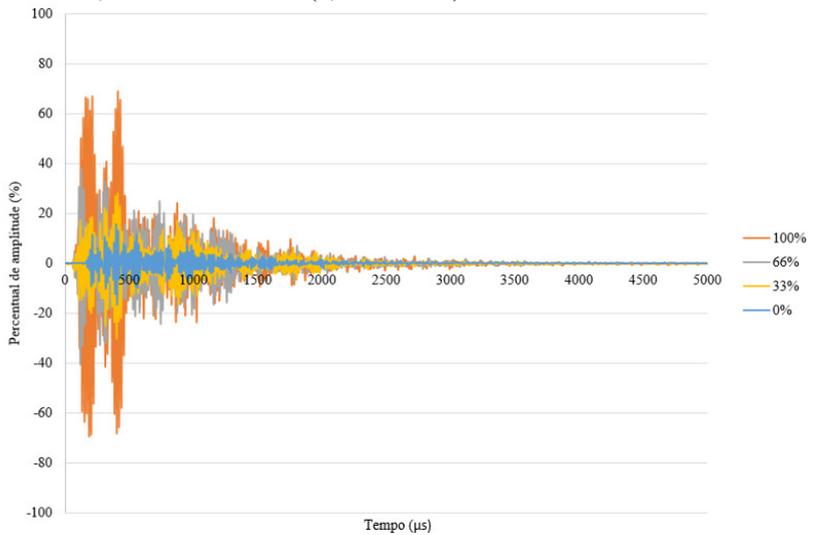
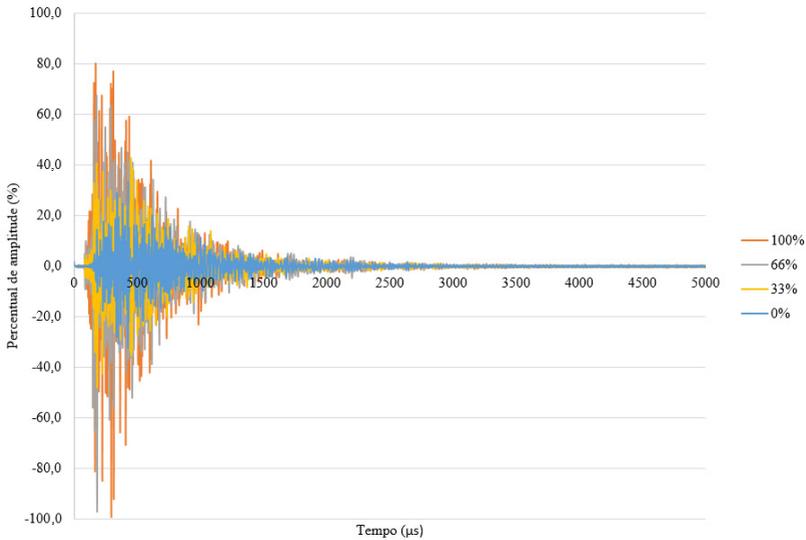


Figura 4.4 - Sinal ultrassônico para o prisma S1-150-3-B, Posição 150 mm, Ganho 50X, Transdutor 200 kHz (0,117 N/mm²).



A visualização dos sinais sobrepostos permite identificar um aumento nos valores de amplitude conforme foi realizada a aplicação de resina, o que mostra um potencial para o estudo da técnica na avaliação de preenchimento do epóxi nas fissuras do concreto.

Com relação aos ganhos de sinal, para o transdutor de 54 kHz utilizou-se o ganho de 1X pois os demais ganhos apresentaram truncamento em algumas posições de leituras conforme se aumentou o preenchimento e foram descartados; da mesma forma para o transdutor de 200 kHz utilizou-se à amplificação de 50X, pois os demais apresentaram sinais muito fracos ou truncados (1000X).

4.3.2. Tempo de propagação

O primeiro parâmetro de análise foi o tempo de propagação detectado pelo o aparelho para a transmissão da primeira onda. A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos para o prisma S1-50-3-A.

Tabela 4.3 - Tempo de propagação para o prisma S1-50-3-A, Transdutor 54 kHz (0,028 N/mm²).

Posição (mm)	Tempo de propagação (μs)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	59	46	44,5	44	43,5
150	82,5	73	73	72,5	71,5
200	106,5	99	97	99	98
250	131,5	128	123	122,5	122,5
300	156,5	146	145	145	144,5

Obs: A célula “Concreto” refere-se aos valores medidos no concreto íntegro conforme subcapítulo 3.6.

Os demais valores encontram-se no Apêndice B.

4.3.3. Energia Total

As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os resultados do cálculo da energia total para o prisma S1-75-3-B de modo que cada linha apresenta o valor da energia e o percentual de aumento ou redução em relação ao valor da coluna anterior. A hipótese é que conforme se aumenta o preenchimento maior será o valor da energia total.

Tabela 4.4 - Valores de energia total para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm² e 0,047 N/mm².

Posição (mm)	Energia Total (V.μs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)					Energia Total (V.μs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	2.918	10.157	35.311	36.231	90.876	5.546	14.018	17.287	46.579	90.622
150	7.588	18.752	38.861	42.774	72.115	28.482	25.028	59.763	126.070	75.577
200	9.075	10.318	21.234	29.728	51.762	8.816	12.958	13.574	22.941	63.046
250	2.942	5.010	17.204	8.987	17.331	3.989	6.209	26.323	7.088	16.881
300	8.442	7.754	15.360	8.402	14.370	3.699	9.724	62.751	8.228	17.388

Tabela 4.5 - Valores de energia total para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm².

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,117 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	15.223	55.844	37.733	29.539	87.349
150	9.999	24.966	25.458	25.432	58.202
200	8.566	12.209	14.139	24.471	19.932
250	4.961	8.443	14.881	15.037	12.867
300	11.038	42.966	40.392	10.940	17.805

Os demais valores encontram-se no Apêndice C.

4.3.4. Amplitude Máxima

As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os resultados do cálculo da amplitude máxima para o prisma S1-75-3-B de modo que cada linha apresenta o valor da amplitude máxima e o percentual de aumento ou redução em relação ao valor da coluna anterior. A hipótese é que conforme se aumenta o preenchimento maior será o valor da amplitude máxima.

Tabela 4.6 - Valores de amplitude máxima para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm² e 0,047 N/mm².

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)					Amplitude Máxima (V) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	12	37	105	144	500	25	58	73	216	499
150	26	123	225	159	264	94	188	378	432	276
200	29	32	77	100	194	28	44	41	83	236
250	12	14	51	28	63	16	19	77	24	61

Tabela 4.7 - Valores de amplitude máxima para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm².

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,117 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	94	480	232	203	371
150	53	113	165	246	230
200	28	39	53	143	62
250	11	40	54	60	63
300	34	198	187	42	51

Os demais valores encontram-se no Apêndice D.

4.3.5. Energia Acumulada

As Figuras 4.5 a 4.7 apresentam os gráficos da energia acumulada para o prisma S1-75-3-B na posição de 200 mm em que cada cor representa uma situação da amostra, conforme subcapítulo 4.3.1. A hipótese é que conforme se aumenta o preenchimento, mais rápido será o acúmulo de energia e maior será a inclinação inicial da curva.

Assim como os gráficos com o sinal, cada cor representa uma condição da amostra:

- Azul: Sinal com fenda vazia (0% de resina);
- Amarelo: Sinal com fenda parcialmente preenchida (33%);
- Cinza: Sinal com fenda parcialmente preenchida (66%);
- Laranja: Sinal com fenda plenamente preenchida (100%);
- Verde: Sinal com concreto íntegro.

Figura 4.5 - Energia Acumulada para o prisma S1-75-3-B, posição 200 mm, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm².

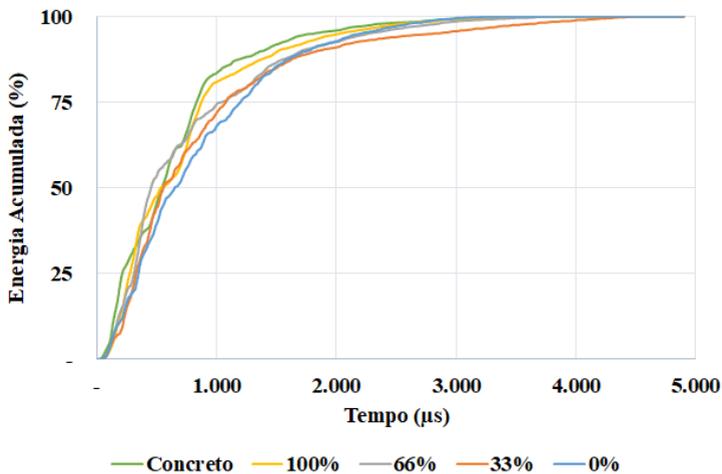


Figura 4.6 - Energia Acumulada para o prisma S1-75-3-B, posição 200 mm, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,047 N/mm².

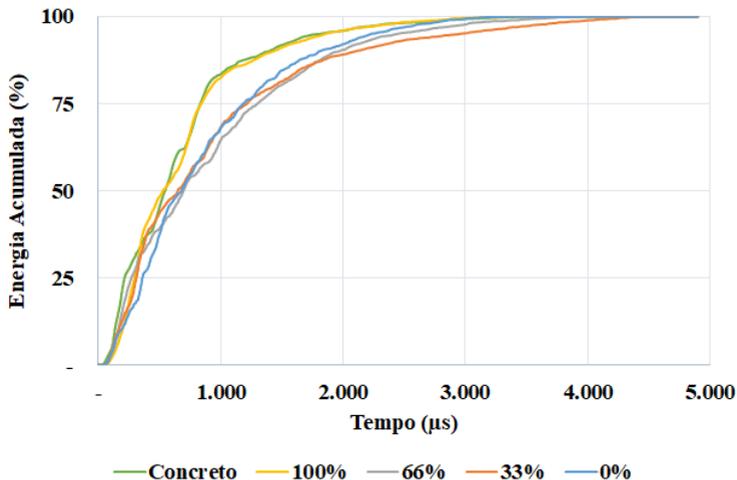
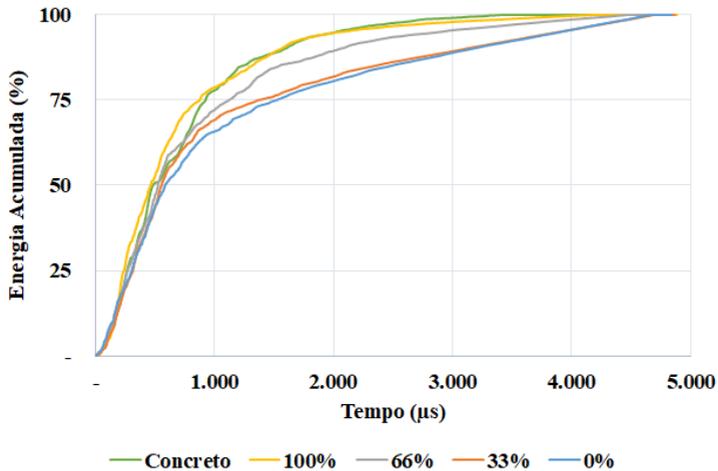


Figura 4.7: Energia Acumulada para o prisma S1-75-3-B, posição 200 mm, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm².



4.3.6. Janelas de tempo: T25, T50, T75 e TC

As janelas de tempo escolhidas representam o tempo que se leva na transmissão do sinal para que se atinja 25%, 50% e 75% da energia total e o tempo para que se atinja o centroide do sinal. Para uma comparação mais equilibrada, o tempo do ruído inicial foi descartado, com o objetivo de se comparar apenas os valores com uma parcela de energia significativa.

As Tabelas 4.8 a 4.15 apresentam os resultados do cálculo dos parâmetros T25, T50, T75 e TC para o prisma S1-75-3-B de modo que cada linha apresenta o valor do tempo e o percentual de aumento ou redução em relação ao valor da coluna anterior. A hipótese é que conforme se aumenta o preenchimento menor será o tempo para que se atinja um determinado percentual de energia.

Tabela 4.8 - Valores do T25 para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm² e 0,047 N/mm².

Posição (mm)	T25 (μs) - S1-753-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)					T25 (μs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	197	239	294	202	135	206	220	252	203	133
150	263	170	174	200	256	265	163	166	232	256
200	347	326	311	276	213	358	308	269	296	213
250	324	358	378	426	281	360	373	333	514	283
300	507	442	410	392	383	430	476	361	418	395

Tabela 4.9 - Valores do T25 para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm².

Posição (mm)	T25 (μs) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,117 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	177	162	171	156	187
150	236	179	186	162	181
200	294	306	265	237	265
250	302	328	342	321	223
300	375	322	318	262	339

Tabela 4.10 - Valores do T50 para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm² e 0,047 N/mm².

Posição (mm)	T50 (μs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)					T50 (μs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	386	568	490	360	271	445	521	456	361	269
150	511	430	306	385	501	539	355	297	390	501
200	650	554	452	533	544	679	648	694	525	544
250	593	729	616	641	534	607	658	630	669	535
300	799	815	645	731	729	664	739	518	741	740

Tabela 4.11 - Valores do T50 para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm².

Posição (mm)	T50 (μs) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,117 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	358	281	300	266	375
150	460	377	351	347	464
200	579	549	525	463	484
250	835	653	554	609	443
300	732	562	567	540	567

Tabela 4.12 - Valores do T75 para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm² e 0,047 N/mm².

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)					T75 (μs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	836	1.152	775	928	635	833	1.060	891	912	634
150	1.089	849	725	897	888	1.080	908	790	842	888
200	1.199	1.076	1.034	874	832	1.182	1.212	1.298	841	832
250	1.027	1.405	1.048	1.020	946	1.062	1.123	1.112	1.039	947
300	1.410	1.458	1.067	1.171	1.127	1.059	1.220	1.092	1.110	1.139

Tabela 4.13 - Valores do T75 para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm².

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,117 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	838	573	588	526	767
150	1.040	744	662	659	974
200	1.489	1.351	1.119	876	925
250	2.418	1.329	1.150	1.314	1.048
300	1.439	965	930	1.042	1.049

Tabela 4.14 - Valores do TC para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 54 kHz, Ganho de 1X e pressão de 0,028 N/mm² e 0,047 N/mm².

Posição (mm)	TC (μs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)					TC (μs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	638	912	729	680	540	658	860	691	667	538
150	769	733	596	661	721	790	714	625	642	721
200	878	911	805	757	700	899	966	949	722	700
250	767	1.143	873	829	758	805	1.035	937	861	759
300	1.061	1.153	886	951	926	895	1.064	887	952	938

Tabela 4.15 - Valores do TC para o prisma S1-75-3-B, Transdutor de 200 kHz, Ganho de 50X e pressão de 0,117 N/mm².

Posição (mm)	TC(μs) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,117 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	813	551	557	512	620
150	980	744	593	610	774
200	1.147	1.111	899	742	755
250	1.471	1.157	980	1.109	706
300	1.143	829	798	908	794

Os demais valores encontram-se no Apêndice E

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir da aquisição dos dados nos ensaios realizados, iniciou-se a análise dos resultados, assunto que será tratado no presente capítulo.

5.1.1. Análises preliminares

5.1.1.1. Detecção das fendas e velocidade indireta

A primeira etapa do trabalho consistiu em detectar as fendas induzidas no concreto (BS 1881 (1986) e calcular a velocidade indireta conforme orienta a NBR 8802 (ABNT, 2013).

Verificou-se que foi possível detectar a fenda conforme recomenda a norma britânica (Figura 4.1) de modo que conforme se aumentou a profundidade da fenda, maior foi o atraso do tempo de propagação da onda e consequentemente a visualização no gráfico ficou mais clara.

Com relação ao cálculo da velocidade indireta, a média dos valores encontrados foi de 3.863 m/s com um coeficiente de variação de 2,85%. Este valor é 5,4% menor que o valor encontrado com as leituras nos corpos-de-prova pelo modo direto estando em acordo com a BS 1881 (1986) a qual menciona que a velocidade indireta pode ser de 5% a 20% menor que a velocidade medida pelo modo direto.

Com base nos resultados considera-se que a análise gráfica foi adequada para a detecção das fendas e para o cálculo da velocidade indireta.

5.1.1.2. Estimativa da profundidade das fendas

Este trabalho apresentou 4 formas de se efetuar a estimativa da profundidade das fendas no concreto com o modo indireto do ensaio de ultrassom, sendo estes: a técnica de Bungey *et al.* (2006); a técnica da norma britânica BS 1881 (1986); os Métodos A e B (PINTO *et al.*, 2010), já mencionados na revisão bibliográfica.

Os resultados mostraram que o Método A foi o que obteve menor erro percentual para estimativa da profundidade da fenda e, portanto, esse padrão de leitura foi utilizado para a aquisição dos sinais.

5.1.1.3. Tempo de propagação

O tempo de propagação da primeira onda do sinal não foi um parâmetro adequado para a verificação do preenchimento das resinas epóxi, conforme já observado por Medeiros (2007). Os resultados mostram que independentemente da quantidade de resina aplicada, os

valores do tempo de propagação mantem-se muito próximos, pois os trajetos de viagem da primeira onda são os mesmos e próximos da superfície. Desta forma, o aumento na velocidade de pulso ultrassônico quando se compara a fenda vazia com a fenda preenchida parcialmente ou por completo é praticamente o mesmo realçando a necessidade de se analisar o sinal por completo para obter maiores informações das condições dos prismas.

5.1.1.4. Variação entre os 14 sinais obtidos em cada posição de leitura

Conforme mencionado no item 3.4.1 inicialmente adotou-se o valor de 14 sinais para cada posição de leitura, a fim de verificar a variação existente no ensaio, o que gerou um total de 1120 sinais por prisma e por aplicação de resina. Isso justifica o uso de uma rotina computacional executada com o modo desenvolvedor do Software MS Office Excel® para a otimização da aquisição e análise dos dados.

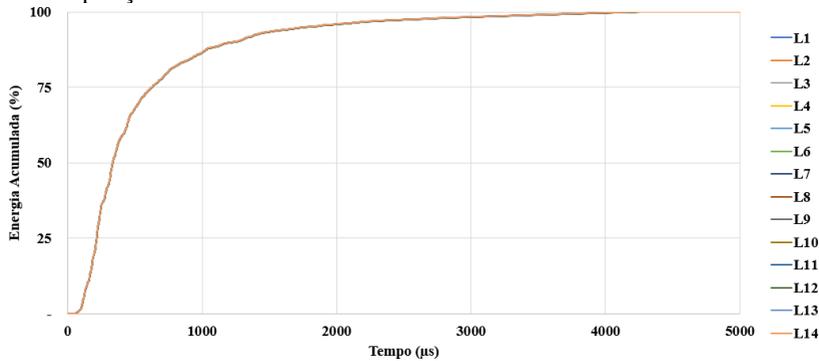
Conforme já mencionado no capítulo 2.2.8.2 (Energia do Sinal) a variabilidade do formato do sinal se deve em especial ao acoplamento dos transdutores. Nesta pesquisa foi realizado o uso de pesos sobre os transdutores para que a pressão fosse constante durante as leituras e isso ocasionou uma variação do formato dos sinais (e dos parâmetros de análise) mínima, com coeficientes de variação menores que de 0,25%, conforme pode-se observar na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Variação nos valores dos parâmetros de 14 sinais obtidos em uma mesma posição de leitura - Prisma S1-75-3-B - 200 kHz (0,117 N/mm²);

Leitura	Tempo (µs)	Energia total (V.µs)	Amplitude (V)	T25 (µs)	T50 (µs)	T75 (µs)	TC (µs)
L1	54,0	55.956	479,5	216	336	627	606
L2	53,8	55.925	480	216	336	627	605
L3	53,7	55.921	481	216	335	625	603
L4	53,7	55.895	479,5	216	336	627	605
L5	54,0	55.770	477,5	216	335	625	603
L6	53,8	55.816	479	216	335	627	606
L7	54,0	55.844	479,5	216	335	627	605
L8	53,9	55.784	477,5	216	335	628	606
L9	53,8	55.775	478	216	335	626	605
L10	54,0	55.720	479,5	216	335	626	605
L11	54,0	55.754	479,5	216	335	625	603
L12	53,8	55.868	479	216	336	628	606
L13	53,9	55.827	480,5	216	335	625	604
L14	54,0	55.992	481	216	335	625	602
Média	54	55.846	479	216	335	627	605
Desvio padrão	0,1	83	1,1	0,0	0,2	1,1	1,3
CV	0,22%	0,15%	0,23%	0,00%	0,07%	0,17%	0,21%

A Figura 5.1 apresenta a sobreposição de 14 curvas de energia acumulada para 14 sinais obtidos na mesma posição de leitura, podendo-se observar que a variação é praticamente nula.

Figura 5.1 - Sobreposição da energia acumulada de 14 sinais obtidos em uma mesma posição de leitura.



Outros fatores que podem ter contribuído para a baixa variabilidade foram a fixação da posição de leitura com uso do gabarito e também o fato de os prismas ensaiados possuírem apenas um dano localizado (a fenda) ao contrário de outras pesquisas em que existe um grau de fissuração elevado, com direções e geometrias aleatórias, como a pesquisa de Carelli (2014), Hoffman (2015) e Viana (2017), por exemplo.

Assim sendo, considerando que não ocorreram variações significativas no sinal que pudessem prejudicar a interpretação das diferentes condições de preenchimento dos prismas, utilizou-se apenas 1 dos 14 sinais gerados por posição para o cálculo dos parâmetros estudados o que permitiu uma redução no tempo de processamento dos dados.

5.1.2. Análises do sinal ultrassônico

Nesta análise buscou-se, primeiramente, verificar a resposta dos parâmetros do sinal com relação aos percentuais de preenchimento do epóxi. As hipóteses para o comportamento dos parâmetros no experimento são:

- Amplitude máxima e energia total: Aumento dos valores em função da maior proporção de preenchimento de epóxi.
- T25, T50, T75, TC: Redução dos valores de tempo conforme se aumenta a proporção de preenchimento de epóxi;

Como os resultados não apresentaram variação entre as 14 medições efetuadas em cada posição de leitura, conforme apresentou o

subcapítulo 5.1.1.4, não foi realizado um tratamento estatístico para a análise da sensibilidade dos parâmetros.

Para validação das hipóteses de detecção do preenchimento parcial considerou-se que os parâmetros de energia total e amplitude máxima, analisados com o preenchimento completo deveriam ser superiores aos com preenchimento parcial e estes superiores aos obtidos sem preenchimento. De uma maneira similar, considerou-se que os parâmetros da janela de tempo, analisados com o preenchimento total deveriam ser inferiores aos com preenchimento parcial e estes inferiores aos obtidos sem preenchimento.

Sendo assim, nas situações a seguir, considerou-se que não houve detecção:

- Se os valores da amplitude máxima do sinal ou energia total obtidos com a fenda vazia (0% de preenchimento) fossem superiores que os obtidos com a fenda parcialmente preenchida (50% de preenchimento);
- Se os valores das janelas de tempo obtidos com a fenda vazia (0%) fossem menores que com a fenda parcialmente preenchida (50%);
- Se os valores de amplitude máxima ou energia total obtidos com as fendas parcialmente preenchidas (33%, 50% e 66%) fossem superiores que os obtidos com a fenda plenamente preenchida (100%);
- Se os valores das janelas de tempo obtidos com as fendas parcialmente preenchidas (33%, 50% e 66%) fossem menores que os obtidos com a fenda plenamente preenchida (100%);

Inicialmente aceitou-se os casos em que a fenda com 33% de preenchimento apresentou valores de amplitude/energia inferiores ou valores das janelas de tempo superiores aos da fenda vazia, pois além de terem sido casos bastante recorrentes nas análises, não comprometem a interpretação da detecção do preenchimento

Nos casos em que se obteve o maior valor de amplitude máxima ou energia total para as leituras com a fenda vazia ou os menores valores das janelas de tempo tenham ocorrido nessa condição, considerou-se que ocorreu uma falha no ensaio e a posição de leitura do prisma analisado foi descartada da análise. Nos casos em que mais de 1/3 das profundidades

de uma mesma série de análise, ocorrer esta situação em uma determinada posição de leitura, descartou-se a posição da avaliação.

Como variáveis do experimento tem-se: a profundidade da fenda; tipo de epóxi aplicado; posições de leitura (distância à fenda); frequência de transmissão do transdutor; pressão exercida pelos transdutores.

Para otimizar a análise, verificou-se primeiramente o percentual de posições testadas por série de prismas que atenderam aos critérios de detecção descritos anteriormente, considerando cada um dos parâmetros avaliados. Procurou-se desta forma identificar os parâmetros mais sensíveis para posteriormente verificar a sensibilidade de detecção considerando as variáveis do experimento.

As Figuras 5.2 a 5.4 a seguir apresentam os gráficos que comparam o percentual total de posições de leitura que atenderam aos critérios de detecção para cada parâmetro avaliado. As cores azul e marrom representam as leituras com o transdutor de 54 kHz (0,028 N/mm² e 0,047 N/mm², respectivamente) e a cor cinza representa as leituras com o transdutor de 200 kHz. Como cada prisma possui 5 posições de leitura possíveis (100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm e 300 mm) a quantidade de vezes que um determinado parâmetro pôde ser contabilizado foi de máximo 30, 25 e 15 vezes para as séries S1-3-A, S1-3-B 25 e S2-20-C respectivamente, considerando todas as profundidades de fendas.

Figura 5.2 - Comparativo da incidência de posições de leitura sensíveis à detecção parcial para cada parâmetro nos prismas da série S1-3-A.

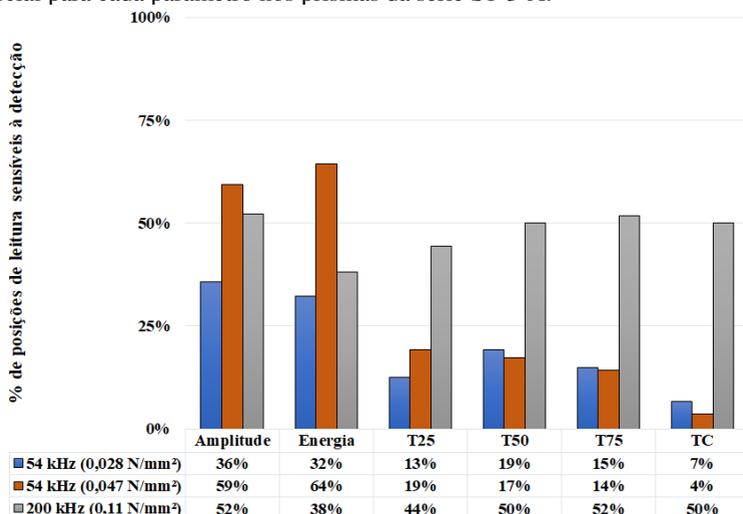


Figura 5.3 - Comparativo da incidência de posições de leitura sensíveis à detecção parcial para cada parâmetro nos prismas da série S1-3-B.

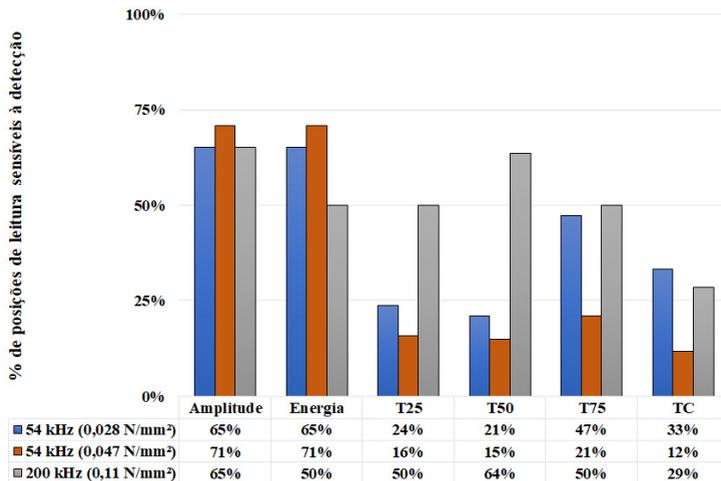
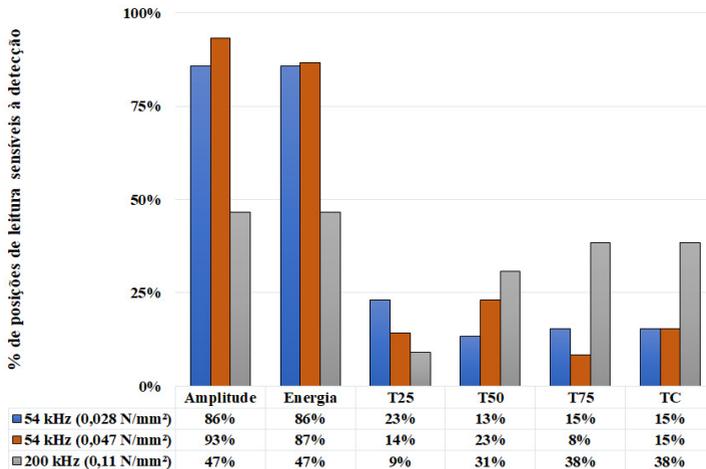


Figura 5.4 - Comparativo da incidência de posições de leitura sensíveis à detecção parcial para parâmetro nos prismas da série S2-20-C.



Com base nas Figuras 5.2 a 5.4, selecionou-se para a análise os parâmetros que obtiveram um percentual mínimo de 50%, descritos a seguir:

Prisma S1-3-A:

- 54 kHz, 0,028 N/mm²: Nenhum parâmetro foi sensível com base no critério adotado;
- 54 kHz, 0,047 N/mm²: Amplitude máxima e Energia Total;
- 200 kHz, 0,117 N/mm²: Amplitude máxima, T50, T75, TC.

Prisma S1-3-B:

- 54 kHz, 0,028 N/mm²: Amplitude máxima e Energia Total;
- 54 kHz, 0,047 N/mm²: Amplitude máxima e Energia Total;
- 200 kHz, 0,117 N/mm²: Amplitude máxima, energia total, T25, T50 e T75.

Prisma S2-20-C:

- 54 kHz, 0,028 N/mm²: Amplitude máxima e Energia Total;
- 54 kHz, 0,047 N/mm²: Amplitude máxima e Energia Total;
- 200 kHz, 0,117 N/mm²: Nenhum parâmetro foi sensível.

A seguir serão apresentadas as posições de leitura em função de cada série que atenderam aos critérios pré-estabelecidos. As posições que apresentaram uma ocorrência mínima de 70% em uma determinada série de prismas foram consideradas adequadas para a validação da técnica de detecção.

5.1.2.1. Prismas S1-3-A

Conforme apresentado no Capítulo 3, foram moldados 6 prismas com diferentes profundidades de fendas para a presente série em que se aplicou a resina epóxi “A” (menor módulo de elasticidade e viscosidade) para a análise dos preenchimentos. As Tabelas a seguir destacam as posições de leitura que atenderam ao critério para cada parâmetro analisado. A letra “x” indica que a leitura foi descartada, conforme apresentado anteriormente na seção 5.1.2.

- S1-3-A: 54 kHz (0,028 N/mm²): Nenhum parâmetro foi sensível com base no critério adotado.

- S1-3-A: 54 kHz (0,047 N/mm²): Tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5.2 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	100	150	200	X	-
50	100	-	-	X	300
75	100	150	200	250	300
100	X	-	200	250	-
150	X	-	X	250	-
220	100	-	200	-	300

Tabela 5.3 - Posições de leitura observadas para o parâmetro a energia total.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	100	150	200	X	-
50	100	-	200	X	300
75	100	150	200	250	300
100	-	-	200	250	-
150	X	-	X	250	-
220	100	-	200	X	300

- S1-3-A: 200 kHz (0,117 N/mm²): Tabelas 5.4 a 5.7.

Tabela 5.4 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	100	150	X	X	0
50	100	X	X	-	X
75	100	150	-	-	300
100	-	150	200	250	-
150	X	-	200	-	-
220	-	150	-	250	X

Tabela 5.5 - Posições de leitura observadas para o parâmetro a T50.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	100	-	200	X	-
50	100	-	200	-	-
75	100	150	200	-	300
100	100	150	200	-	-
150	100	-	200	-	300
220	-	150	200	-	-

Tabela 5.6 - Posições de leitura observadas para o parâmetro a T75.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	100	-	-	X	-
50	100	X	-	250	-
75	-	-	200	-	-
100	100	150	200	250	-
150	100	-	200	250	-
220	100	150	200	-	X

Tabela 5.7 - Posições de leitura observadas para o parâmetro a TC.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	100	-	-	-	300
50	100	X	200		300
75	100	150	200	-	-
100	100	150	200	-	-
150	-	-	-	-	-
220	100	150	200	-	X

Os resultados dos ensaios com o transdutor de 54 kHz mostraram que conforme se aumentou a quantidade de resina “A” nas fendas, maiores foram os valores de amplitude máxima e energia total dos sinais

para determinadas posições de leitura. Os ensaios com a pressão de 0,028 N/mm² apresentaram-se adequados para as posições 100 mm e 250 mm, pois em 80% dos casos, essas posições foram capazes de detectar preenchimentos parciais.

Ao se elevar o nível de pressão de acoplamento dos transdutores, verificou-se que o número de posições sensíveis à detecção parcial foi maior para ambos os parâmetros, com destaque para as posições 100 mm e 200 mm. Conforme se observa nas Figuras 5.5 e 5.6 fica claro o aumento do número de posições com a elevação da pressão e destaca-se que a posição de 100 mm foi a que obteve resultados adequados para ambas as pressões.

Figura 5.5 - Percentual de ocorrência das posições de leitura sensíveis para as pressões de 0,028 N/mm² e 0,047 N/mm² (54 kHz) - parâmetro: amplitude máxima.

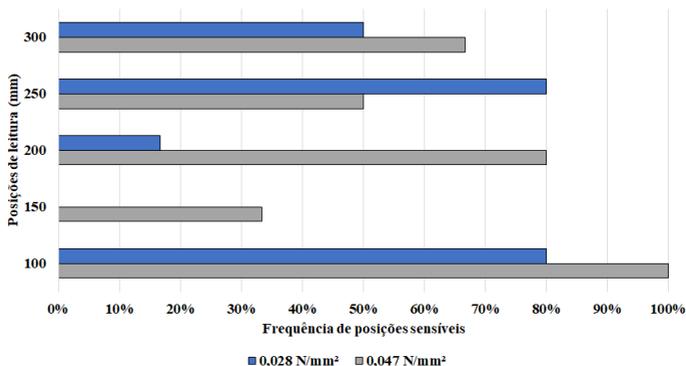
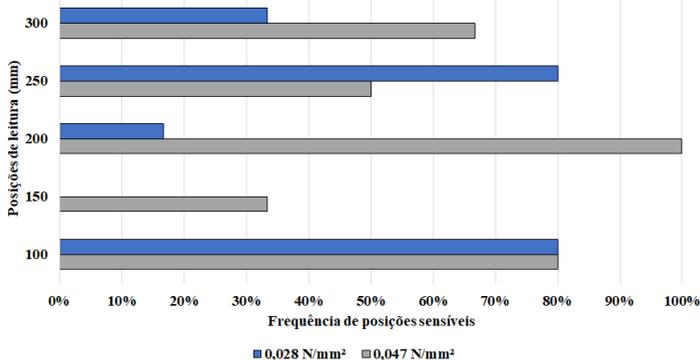


Figura 5.6 - Percentual de ocorrência das posições de leitura sensíveis para as pressões de 0,028 N/mm² e 0,047 N/mm² (54 kHz) - parâmetro: energia total.

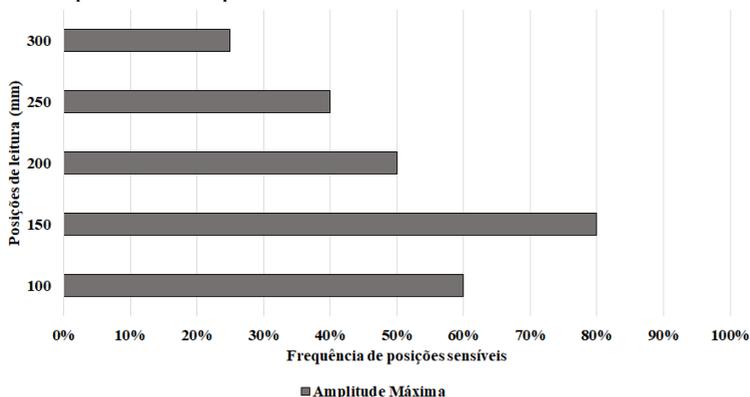


Esta elevação, possivelmente se deve à maior transferência de energia entre o transdutor e o concreto já que a maior pressão provoca um acoplamento com menor volume de ar e conseqüentemente menor coeficiente de reflexão.

Com relação aos resultados obtidos com o transdutor de 200 kHz pode-se observar que além da amplitude máxima, as janelas de tempo (T50, T75 e TC) também foram parâmetros sensíveis às aplicações de epóxi. Isso mostra que em determinadas posições um aumento na quantidade de epóxi proporcionou uma redução no tempo para o acúmulo de um determinado percentual de energia assim como um aumento nos valores de da amplitude máxima do sinal.

Observa-se por meio da Figura 5.7 que para essa frequência, ao se efetuar as leituras próximas das fendas, a sensibilidade dos parâmetros da energia e amplitude foram maiores, tendo-se como destaque a posição de 150 mm.

Figura 5.7 - Percentual de ocorrência das posições de leitura para o transdutor de 200 kHz - parâmetro: amplitude máxima.



Para as janelas de tempo T50 e T75, as leituras das posições 100 mm e 200 mm foram as mais adequadas, apresentando sensibilidade acima de 80%. A vantagem do uso das janelas de tempo está na análise gráfica da energia acumulada para diferentes percentuais de preenchimento da fenda com epóxi, conforme apresentam as Figuras 5.8 a 5.15.

Considera-se uma visualização adequada quando é possível distinguir a curva relativa ao preenchimento total das demais. Conforme apresentado no item 5.1.1.4, a variação da curva de energia acumulada para uma determinada posição de leitura foi praticamente nula e, portanto,

quaisquer alterações no comportamento das curvas foram consideradas como significativas.

Figura 5.8 - Energia Acumulada do prisma S1-25-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 50% / 100% (posição de leitura: 100 mm).

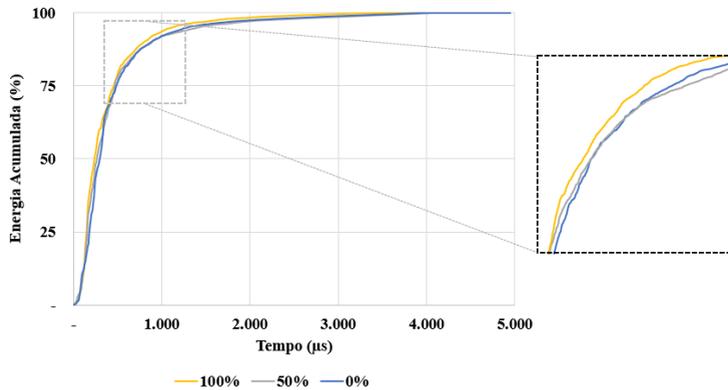


Figura 5.9 - Energia Acumulada do prisma S1-50-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 100 mm).

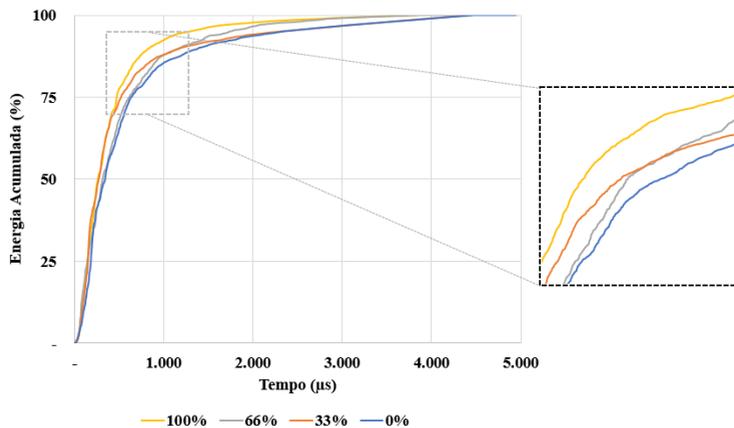


Figura 5.10 - Energia Acumulada do prisma S1-100-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 100 mm).

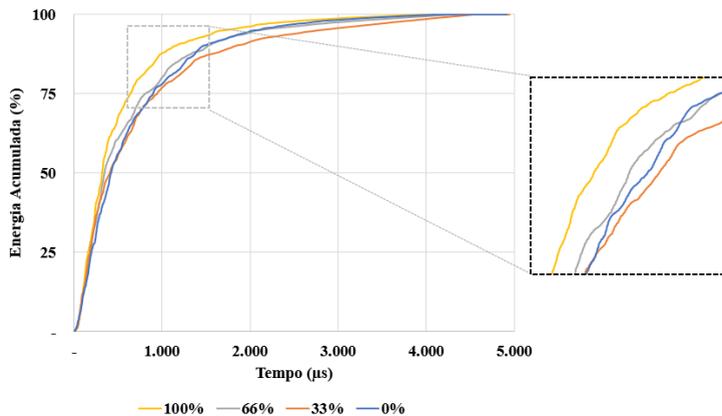


Figura 5.11 - Energia Acumulada do prisma S1-150-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 100 mm).

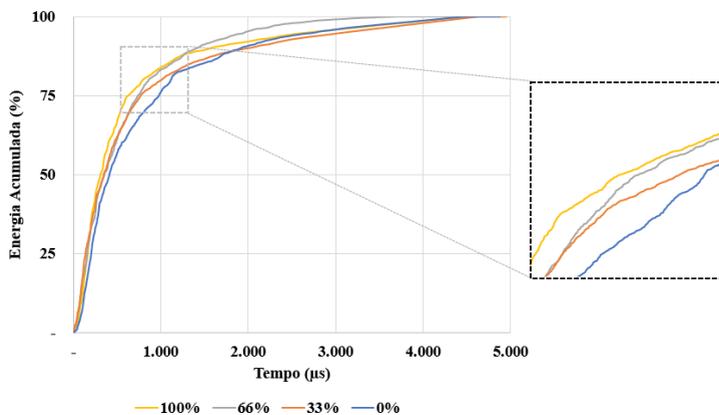


Figura 5.12 - Energia Acumulada do prisma S1-220-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 100 mm).

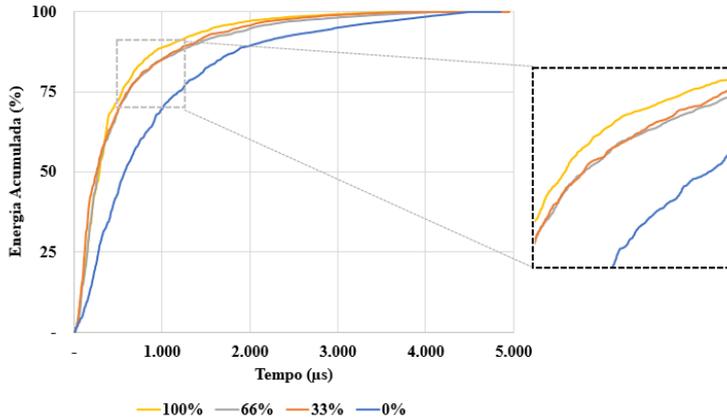


Figura 5.13 - Energia Acumulada do prisma S1-100-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 200 mm).

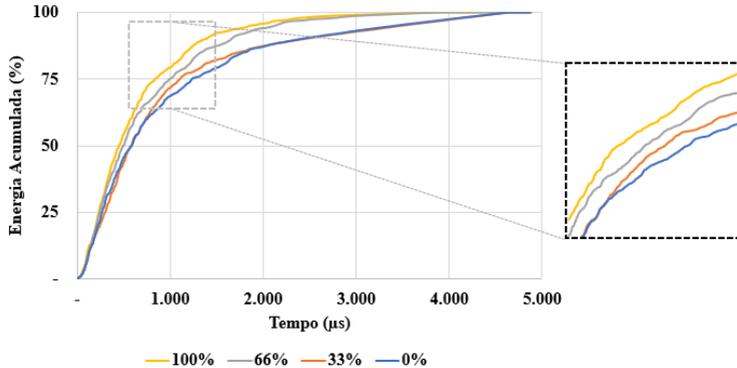


Figura 5.14 - Energia Acumulada do prisma S1-150-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 200 mm).

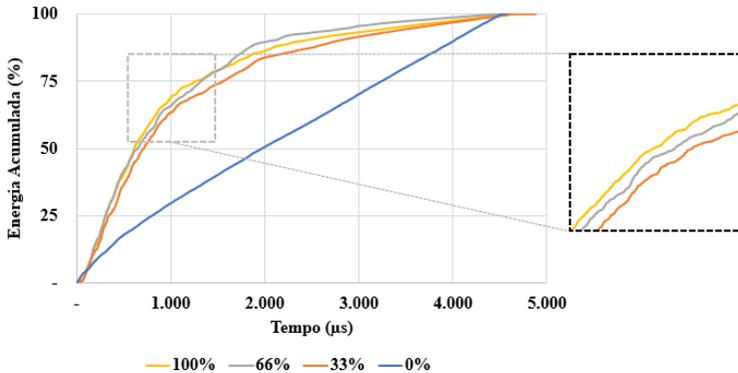
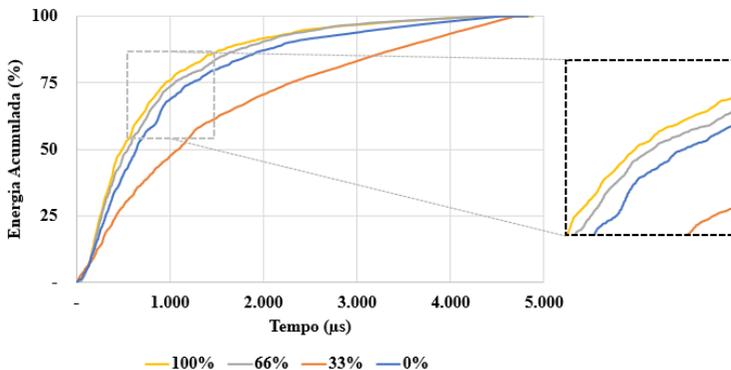


Figura 5.15 - Energia Acumulada do prisma S1-220-3-A com o percentual de preenchimento de epóxi 0% / 33% / 66% / 100% (posição de leitura: 200 mm).



Observa-se que a partir de 50% da energia acumulada, as curvas apresentam um maior distanciamento entre elas, o que favorece a interpretação para detecção do preenchimento.

A janela de tempo relacionada ao centroide do sinal (TC), também foi um parâmetro sensível, com destaque para as posições 100 mm, 150 mm e 200 mm. As Figuras 5.16 a 5.19 ilustram a redução do tempo de chegada ao centroide do sinal em função do percentual de preenchimento:

Figura 5.16 – Redução do parâmetro TC para cada percentual de preenchimento – S1-50-3-A.

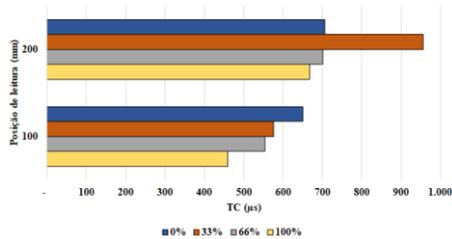


Figura 5.17 – Redução do parâmetro TC para cada percentual de preenchimento – S1-75-3-A.

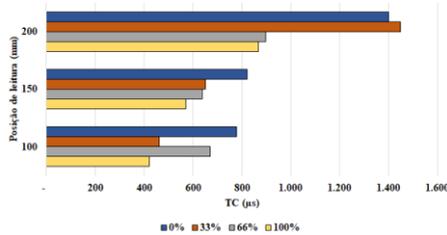


Figura 5.18 – Redução do parâmetro TC para cada percentual de preenchimento – S1-100-3-A.

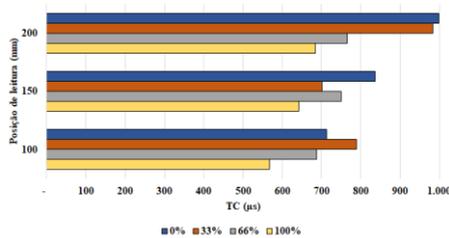
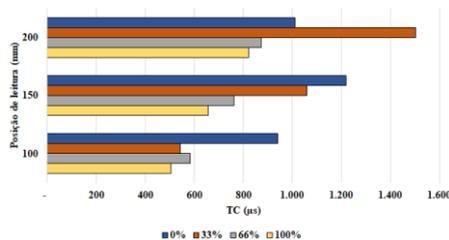


Figura 5.19 – Redução do parâmetro TC para cada percentual de preenchimento – S1-220-3-A.



Assim sendo, a análise mostrou que para os prismas S1-3-A houve um aumento na quantidade de pontos de leitura sensíveis ao preenchimento das fendas ao se aumentar a pressão exercida pelos transdutores de 54 kHz de modo que para todas as alturas de fendas os parâmetros da amplitude e da energia total apresentaram uma tendência de aumento. Já o uso do transdutor de 200 kHz mostrou que os parâmetros relacionados à janela de tempo são sensíveis à detecção e considera-se que o uso do transdutor de maior frequência é adequado para o uso na análise da energia acumulada e do parâmetro TC. A Tabela 5.8 apresenta o resumo dos parâmetros e posições sensíveis para cada modo de leitura.

Tabela 5.8 - Resumo dos parâmetros e posições sensíveis para cada modo de leitura (S1-3-A).

	Modo de leitura	Parâmetro	Posições sensíveis		
	Série de Prisma S1 - 3 -A	54 kHz 0,028 N/mm ²	Amplitude	100	250
Energia			100	250	-
54 kHz 0,047 N/mm ²		Amplitude	100	200	-
		Energia	100	200	-
200 kHz 0,117 N/mm ²		Amplitude	150	-	-
		T50	100	200	-
		T75	100	200	-
		TC	100	200	-

5.1.2.2. Prismas S1-3-B

A série S1-3-B possui 5 primas com abertura das fendas de 3 mm e profundidades de 25 mm, 50 mm, 75 mm, 150 mm e 220 mm, totalizando 25 posições de leitura. Nessa série foi aplicado o Epóxi B, que possui maior módulo de elasticidade e maior viscosidade em relação ao Epóxi A.

- S1-3-B: 54 kHz (0,028 N/mm²): Tabelas 5.9 e 5.12.

Tabela 5.9 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	100	150	200	250	300
50	X	150	200	-	300
75	100	-	200	-	X
150	100	-	-	-	300
220	100	150	-	250	-

Tabela 5.10 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da energia total.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	100	150	200	250	300
50	X	150	200	-	300
75	100	150	200	-	X
150	100	-	-	-	-
220	100	150	-	250	-

- S1-3-B: 54 kHz (0,047 N/mm²): Tabelas 5.13 e 5.14.

Tabela 5.11 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	100	150	200	250	300
50	100	-	-	-	300
75	100	150	200	-	-
150	100	150	-	250	-
220	100	150	X	250	300

Tabela 5.12 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da energia total.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	100	150	200	250	300
50	100	-	-	-	300
75	100	150	200	-	-
150	100	150	-	250	-
220	100	150	X	250	300

- S1-3-B: 200 kHz (0,117 N/mm²): Tabelas 5.13 a 5.17.

Tabela 5.13 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	100	-	200	250	300
50	100	150	-	X	300
75	-	150	200	250	X
150	100	150	200	X	X
220	100	150	-	X	X

Tabela 5.14 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da Energia Total.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	100	-	200	-	300
50	100	150	X	X	300
75	-	-	200	250	X
150	-	150	-	X	X
220	100	150	X	X	X

Tabela 5.15 - Posições de leitura observadas para o parâmetro T25.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	X	X	-	250	-
50	-	150	-	X	300
75	100	150	200	250	300
150	-	150	200	X	X
220	-	-	200	-	300

Tabela 5.16 - Posições de leitura observadas para o parâmetro T50.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	-	X	200	-	300
50	-	150	-	-	300
75	100	150	200	-	300
150	100	150	200	X	X
220	-	150	200	-	300

Tabela 5.17 - Posições de leitura observadas para o parâmetro T75.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
25	-	150	200	-	300
50	-	-	-	250	300
75	100	150	200	-	-
150	-	150	200	X	X
220	-	-	200	-	-

Verifica-se que para ambas pressões (0,028 N/mm² e 0,047 N/mm²) os parâmetros da amplitude máxima e energia total foram sensíveis ao preenchimento com epóxi B. Observa-se que o aumento da pressão provocou um aumento na ocorrência de posições sensíveis e tem-se como destaque a posição de 100 mm que obteve sensibilidade de 100% para todos os prismas. Essa verificação pode ser melhor visualizada por meio das Figuras 5.20 e 5.21.

Figura 5.20 - Percentual de ocorrência das posições de leitura sensíveis para as pressões de 0,028 N/mm² e 0,047 N/mm² (54 kHz) - parâmetro: amplitude máxima.

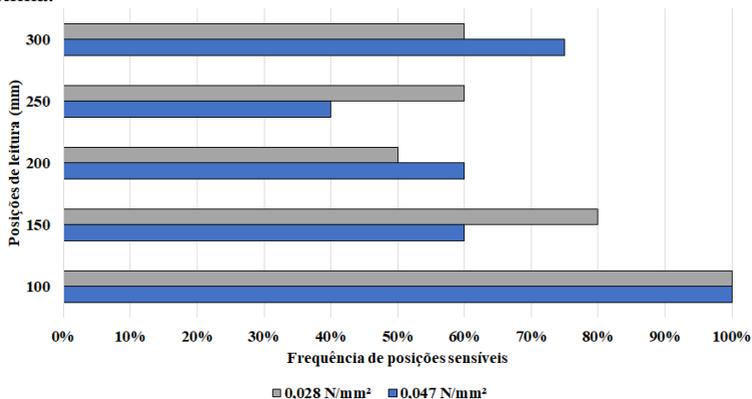
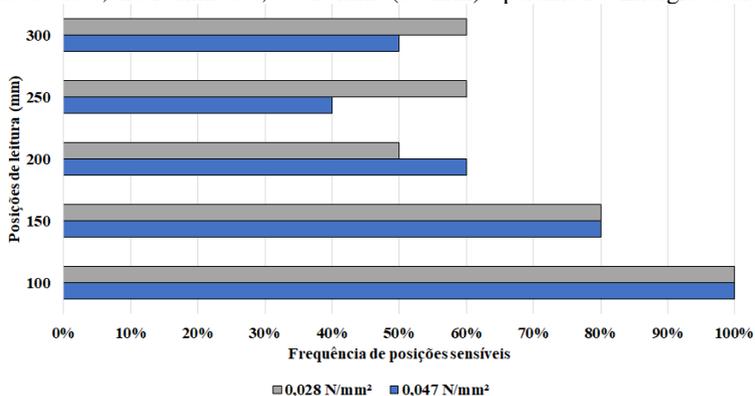


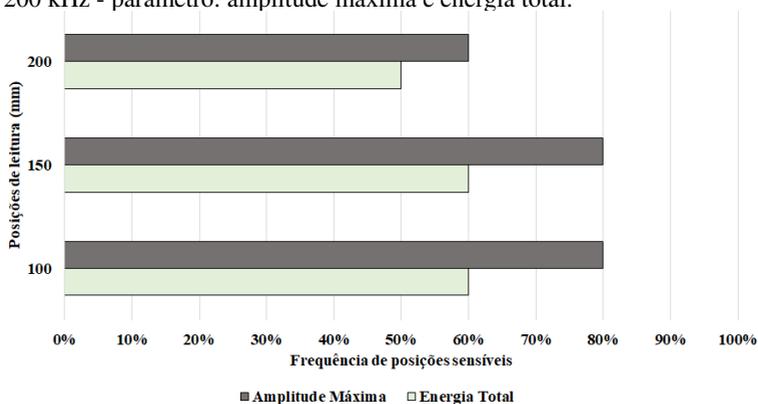
Figura 5.21 - Percentual de ocorrência das posições de leitura sensíveis para as pressões de 0,028 N/mm² e 0,047 N/mm² (54 kHz) - parâmetro: Energia total.



Para o transdutor de 200 kHz, além do parâmetro de amplitude máxima e energia total, novamente as janelas de tempo apresentaram sensibilidade, com exceção do parâmetro TC. Verifica-se que as posições 100 mm e 150 mm obtiveram sensibilidade de 80% para a amplitude máxima. As posições de leitura de 250 mm e 300 mm não foram consideradas já que em mais de 1/3 dos prismas ocorreu a falha de ensaio, critério de descarte especificado na seção 5.1.2.

A Figura 5.22 apresenta a ocorrência das posições de leitura para o transdutor de 200 kHz nos parâmetros da amplitude máxima e energia total.

Figura 5.22 - Percentual de ocorrência das posições de leitura para o transdutor de 200 kHz - parâmetro: amplitude máxima e energia total.



Com relação as janelas de tempo, verifica-se que a posição de 200 mm foi a que obteve a maior incidência de resultados (80% das posições) para as janelas de tempo T50 e T75 o que favorece a análise por meio do gráfico de energia acumulada para essa posição, conforme ilustram as Figuras 5.23 a 5.26.

Figura 5.23 - Energia Acumulada do prisma S1-25-3-B (posição de leitura: 200 mm).

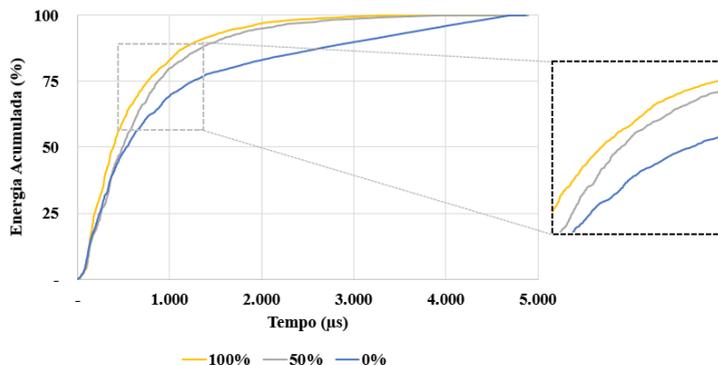


Figura 5.24 - Energia Acumulada do prisma S1-75-3-B (posição de leitura: 200 mm).

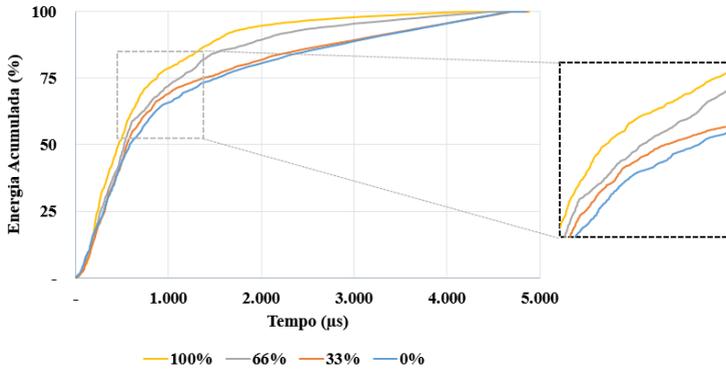


Figura 5.25 - Energia Acumulada do prisma S1-150-3-B (posição de leitura: 200 mm).

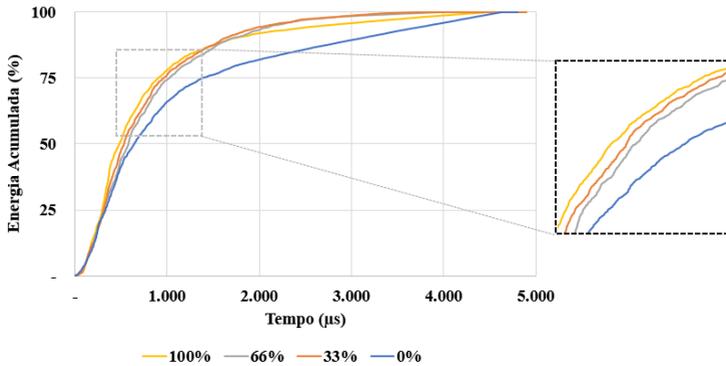
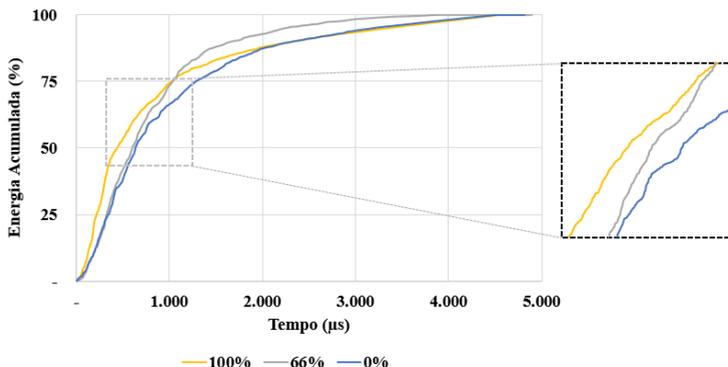


Figura 5.26 - Energia Acumulada do prisma S1-220-3-B (posição de leitura: 200 mm)



A Tabela 5.18 apresenta o resumo dos parâmetros e posições sensíveis para cada modo de leitura.

Tabela 5.18 - Resumo dos parâmetros e posições sensíveis para cada modo de leitura (S1-3-B).

	Modo de leitura	Parâmetro	Posições sensíveis		
Série de Prisma S1 - 3 - B	54 kHz 0,028 N/mm ²	Amplitude	100	300	-
		Energia	100	150	-
	54 kHz 0,047 N/mm ²	Amplitude	100	150	-
		Energia	100	150	-
	200 kHz 0,117 N/mm ²	Amplitude	100	150	-
		T50	150	200	300
T75		200	-	-	

5.1.2.3. Prisma S2-20-C.

Esta série foi criada para verificar o comportamento de sinal ultrassônico em relação à uma resina epóxi de elevada viscosidade, aplicada em uma fenda com maior abertura, se comparado aos prismas da série 1. Os prismas foram moldados com fendas induzidas com profundidades de 50 mm, 75 mm e 100 mm.

- S2-20-C 54 kHz (0,028 N/mm²): Tabelas 5.19 e 5.22.

Tabela 5.19 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
50	100	150	200	250	300
75	100	X	-	-	300
100	100	150	200	250	300

Tabela 5.20 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da energia total.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
50	100	150	200	250	300
75	100	X	-	-	300
100	100	150	200	250	300

- S2-20-C 54 kHz (0,047 N/mm²): Tabelas 5.23 e 5.24.

Tabela 5.21 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da amplitude máxima

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
50	100	150	200	250	300
75	100	-	200	250	300
100	100	150	200	250	300

Tabela 5.22 - Posições de leitura observadas para o parâmetro da energia total.

Profund. (mm)	Posições de leitura (mm)				
50	100	150	200	250	-
75	100	-	200	250	300
100	100	150	200	250	300

- S2-20-C 200 kHz (0,117 N/mm²): Nenhum parâmetro foi sensível.

Verifica-se que ao se utilizar o transdutor de 54 kHz a tendência para esta série se mostrou similar às anteriores já que os parâmetros de energia total e amplitude máxima foram sensíveis ao preenchimento para ambas as pressões exercidas. A posição de 100 mm detectou o preenchimento parcial em todos os prismas para as duas pressões e foi considerada a mais adequada para execução do ensaio.

Com relação às leituras efetuadas com a frequência de 200 kHz considerou-se que nenhum parâmetro foi capaz de detectar o preenchimento parcial. Acredita-se que o valor da abertura da fenda (20 mm) por ser próximo ao valor do comprimento de onda do sinal de 200 kHz tenha contribuído para que a detecção de preenchimento parcial de epóxi não tenha sido possível.

A Tabela 5.23 apresenta o resumo dos parâmetros e posições sensíveis para cada modo de leitura.

Tabela 5.23 - Resumo dos parâmetros e posições sensíveis para cada modo de leitura (S2-20-C).

	Modo de leitura	Parâmetro	Posições sensíveis			
Prisma S2 - 20 - C	54 kHz 0,028 N/mm ²	Amplitude	100	150	300	-
		Energia	100	150	300	-
	54 kHz 0,047 N/mm ²	Amplitude	100	200	250	300
		Energia	100	200	250	
	200 kHz 0,117 N/mm ²					

5.1.2.4. Considerações sobre os modos de leitura: parâmetros, posições sensíveis e frequência de transmissão

Pôde-se constatar que para as leituras realizadas com o transdutor de 54 kHz, os únicos parâmetros sensíveis com base no critério adotado foram a amplitude máxima e a energia total do sinal. A elevação da pressão de acoplamento dos transdutores provocou um aumento no

número de posições sensíveis; entretanto, como a posição de 100 mm foi a que apresentou melhores resultados, sendo a única posição sensível à detecção para as duas pressões nas duas séries, considera-se essa distância a mais adequada para o uso nos ensaios.

Ao contrário das leituras com frequência de 54 kHz, o uso do transdutor de 200 kHz, apresentou sensibilidade à detecção para os parâmetros relacionados às janelas de tempo, com destaque para a posição de 200 mm dos prismas das séries S1-3-A e S1-3-B. Acredita-se que a maior sensibilidade das janelas de tempo ao preenchimento se deva à característica das ondas de maior frequência, que ao trafegar pelo concreto, tornam-se atenuadas mais rapidamente que os pulsos de frequências menores, conforme mencionado no Capítulo 2. Cabe salientar que as janelas de tempo são um indicativo das curvas de energia acumulada de modo que a análise gráfica pode auxiliar no entendimento do comportamento do sinal e da condição do concreto.

A profundidade dos prismas não apresentou influência no experimento já que foi possível a detecção dos diferentes níveis de preenchimento em todas as profundidades analisadas.

5.1.2.5. Comparativo entre os tipos de resina epóxi.

Com base nos valores de velocidade longitudinal das amostras de epóxi, calculados com o ultrassom, conforme Tabela 3.1, e com os valores de densidade das resinas, pode-se obter o valor da impedância acústica de cada material, conforme Tabela 5.24.

Tabela 5.24 - Valores de densidade e velocidade longitudinal de cada resina para obtenção da impedância acústica.

Resina	Densidade (kg/m³)	Veloc. Long. (m/s)	Impedância acústica (kg/m².s)
Epóxi A	1040	2459	2,56 x 10 ⁶
Epóxi B	1100	2513	2,76 x 10 ⁶
Epóxi C	1710	2808	4,8 x 10 ⁶

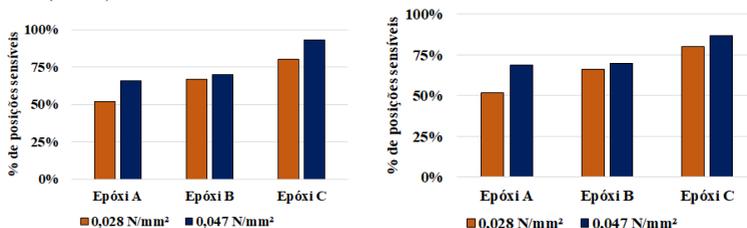
Em seguida, calculou-se o valor do coeficiente de reflexão e o coeficiente de transmissão de cada resina com relação ao concreto, considerando-se uma incidência normal, conforme Tabela 5.25.

Tabela 5.25 - Coeficiente de reflexão e coeficiente de transmissão de cada resina.

Coeficiente	Epóxi A	Epóxi B	Epóxi C
Coef. Reflexão	0,58	0,55	0,33
Coef. Transmissão	0,42	0,44	0,66

Verificou-se que o uso de uma resina epóxi com coeficiente de transmissão maior aumentou a quantidade total de posições de leitura sensíveis ao preenchimento para os parâmetros de energia total e amplitude máxima, com o uso do transdutor de 54 kHz, em ambas pressões, conforme Figura 5.27.

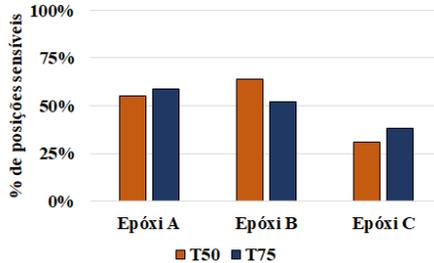
Figura 5.27 – Aumento do percentual de posições sensíveis para os diferentes tipos de epóxi (54 kHz) – parâmetro da amplitude máxima (à esq.) e energia total (à dir.).



Entretanto, como a posição de leitura de 100 mm foi a mais adequada para a detecção do preenchimento, independentemente do tipo de epóxi aplicado, torna-se possível o uso dos parâmetros de amplitude máxima e energia total.

Com relação às janelas de tempo obtidas com o transdutor de 200 kHz (T50 e T75), observa-se que a redução do coeficiente de reflexão da resina provocou uma redução no percentual de posições sensíveis (Figura 5.28).

Figura 5.28 - Redução do percentual de posições sensíveis para os diferentes tipos de epóxi (200 kHz) – parâmetros T50 e T75.



Observa-se que para as janelas de tempo, o Epóxi A e o Epóxi B apresentaram sensibilidades relativamente próximas e considera-se que esse fato esteja relacionado à proximidade dos valores de impedância acústica dos materiais. Ao se considerar o Epóxi C, percebe-se que em nenhuma das análises se teve as janelas de tempo como parâmetros sensíveis. A priori, considera-se que conforme se aumenta o coeficiente de reflexão, maior é a sensibilidade deste parâmetro para alterações no preenchimento.

5.1.2.6. Percentual de alteração no valor absoluto do parâmetro em função do percentual de aplicação da resina

Ainda que exista uma relação entre o percentual de alteração do valor de cada parâmetro em função do percentual de preenchimento para cada posição de leitura, ao se analisar todas as posições simultaneamente verificou-se que não foi possível se obter uma relação entre a alteração do percentual dos valores dos parâmetros em função da posição ou em função do preenchimento. Sendo assim, por meio da análise simultânea das posições de leitura não é possível efetuar uma previsão do preenchimento de epóxi para outros prismas em função do valor obtido.

As análises mostram que cada peça deve ser analisada de forma independente, sendo a referência a própria amostra, e ainda que as condições de ensaio tenham sido fixadas, existem variações internas ao material interferindo no comportamento do sinal, tais como a proporção de epóxi em relação à seção transversal do prisma, a condição da superfície e do acoplamento e a própria distribuição aleatória dos componentes do concreto.

Uma forma de visualizar esse efeito se dá por meio das Tabelas 5.26 a 5.30 a seguir os quais mostram a variação dos valores dos

parâmetros entre os prismas da série S1-3-A e S1-3-B, antes de terem as fendas preenchidas, ou seja, externamente semelhantes.

Tabela 5.26 - Percentual de variação ente os valores obtidos para os prismas S1-25-3-A e S1-25-3-B, antes do preenchimento das fendas.

Parâmetro	S1-3-25						
	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm	Média	Máximo
T25	21%	3%	25%	13%	2%	13%	25%
T50	4%	12%	59%	35%	13%	24%	59%
T75	3%	6%	113%	111%	25%	51%	113%
TC	0%	9%	46%	44%	23%	24%	46%
Amplitude	6%	71%	108%	225%	161%	114%	225%
Energia	13%	43%	96%	131%	103%	77%	131%

Tabela 5.27 - Percentual de variação ente os valores obtidos para os prismas S1-50-3-A e S1-50-3-B, antes do preenchimento das fendas.

Parâmetro	S1-3-50						
	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm	Média	Máximo
T25	3%	16%	17%	10%	18%	13%	18%
T50	5%	31%	36%	25%	19%	23%	36%
T75	6%	58%	65%	49%	17%	39%	65%
TC	16%	39%	52%	32%	22%	32%	52%
Amplitude	81%	86%	554%	130%	648%	300%	648%
Energia	165%	56%	243%	84%	324%	174%	324%

Tabela 5.28 - Percentual de variação ente os valores obtidos para os prismas S1-75-3-A e S1-75-3-B, antes do preenchimento das fendas.

Parâmetro	S1-3-75						
	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm	Média	Máximo
T25	6%	4%	20%	13%	6%	10%	20%
T50	5%	7%	19%	18%	8%	11%	19%
T75	20%	24%	53%	9%	2%	22%	53%
TC	4%	19%	22%	7%	1%	11%	22%
Amplitude	8%	48%	38%	23%	9%	25%	48%
Energia	7%	69%	54%	9%	10%	30%	69%

Tabela 5.29 - Percentual de variação ente os valores obtidos para os prismas S1-150-3-A e S1-150-3-B, antes do preenchimento das fendas.

Parâmetro	S1-3-150						
	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm	Média	Máximo
T25	18%	14%	40%	21%	22%	23%	40%
T50	20%	20%	170%	46%	50%	61%	170%
T75	5%	50%	126%	51%	67%	60%	126%
TC	16%	44%	65%	37%	40%	40%	65%
Amplitude	84%	532%	380%	187%	361%	309%	532%
Energia	81%	324%	157%	138%	181%	176%	324%

Tabela 5.30 - Percentual de variação ente os valores obtidos para os prismas S1-220-3-A e S1-220-3-B, antes do preenchimento das fendas.

Parâmetro	S1-3-220						
	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm	Média	Máximo
T25	20%	0%	10%	1%	5%	7%	20%
T50	23%	4%	0%	13%	4%	9%	23%
T75	31%	10%	5%	53%	13%	22%	53%
TC	27%	5%	2%	32%	9%	15%	32%
Amplitude	125%	40%	7%	145%	64%	76%	145%
Energia	103%	22%	4%	155%	47%	66%	155%

De acordo com os resultados, ainda que os prismas tenham sido moldados com o mesmo traço, sob a mesma condição de cura e apresentem a mesma geometria, existem variações internas no material, devido à sua heterogeneidade e isso provoca alterações nos valores dos parâmetros do sinal. Desta forma, em nenhum dos casos de análise foi possível identificar uma tendência que relacione o percentual de alteração no valor do parâmetro em função do percentual de aplicação da resina o que impede a estimativa do preenchimento para outras geometrias de prismas, devendo a análise ser individual, por meio de uma referência presente no próprio material. Esta constatação está dentro do observado na pesquisa de Aggelis, Shiotani e Polyzos (2009) em que foi apresentado um incremento similar do valor de amplitude conforme se aplicou a resina para duas diferentes profundidades, porém as fendas foram induzidas em uma mesma amostra e possivelmente fora reduzido o efeito da heterogeneidade do concreto que permitiu relacionar o percentual de alteração do parâmetro com o percentual de resina aplicada.

5.1.3. Análises do sinal ultrassônico das leituras de referência no concreto

Em uma situação prática, os únicos sinais obtidos durante uma inspeção serão por meio das leituras com as fissuras vazias e após o preenchimento com epóxi destas. Como visto anteriormente a condição de cada concreto varia, ainda que o material possua características de moldagem semelhantes, de modo que a referência se encontra na própria amostra. Sendo assim, para que se possa avaliar o resultado de um determinado parâmetro do sinal obtido após o preenchimento de uma fissura, torna-se necessário ter-se um sinal de referência para permitir uma comparação entre o valor medido e o valor de correspondência.

Nesta pesquisa, buscou-se verificar se o sinal obtido na face oposta à de aplicação da resina, ou seja, a superfície sem a presença da fenda e com o concreto íntegro, poderia ser utilizado como referência para um sinal com a fenda plenamente preenchida. Como a região possui mesma altura de moldagem, subentende-se que as características internas seriam semelhantes assim como sinais com formatos próximos.

A pesquisa de Aggelis *et. al* (2009), mostrou que o sinal obtido com o ensaio em uma superfície com concreto íntegro apresentou-se semelhante ao sinal obtido em uma região com a fenda plenamente preenchida. Com base nisso, foi realizada a comparação entre os valores dos parâmetros dos sinais obtidos com a fenda completamente preenchida e a região de concreto íntegro, conforme apresenta a Tabela 5.31.

Tabela 5.31 – Comparação os valores de energia total dos sinais obtidos com a fenda completamente preenchida e a região de concreto íntegro.

Energia Total (V.µs)				
Série	Profundidade (mm)	100%	Concreto	Diferença (%)
S1-3-A 0,028 N/mm ²	25	54.616	32.886	39,8%
	50	130.945	114.822	12,3%
	75	89.983	59.613	33,8%
	100	37.397	133.924	258,1%
	150	31.739	48.954	54,2%
	220	62.244	15.315	75,4%
S1-3-A 0,047 N/mm ²	25	56.858	49.507	12,9%
	50	152.383	52.994	65,2%
	75	59.372	52.558	11,5%
	100	36.219	30.063	17,0%
	150	15.476	11.434	26,1%
	220	46.710	30.279	35,2%
S1-3-B 0,028 N/mm ²	25	33.485	35.860	7,1%
	50	31.200	76.010	143,6%
	75	36.231	90.876	150,8%
	150	71.485	69.011	3,5%
	220	51.922	30.918	40,5%
S1-3-B 0,047 N/mm ²	25	34.615	30.481	11,9%
	50	49.581	66.470	34,1%
	75	46.579	90.622	94,6%
	150	104.999	83.503	20,5%
	220	55.828	38.956	30,2%
S1-20-C 0,028 N/mm ²	50	96.735	85.752	11,4%
	75	164.850	169.044	2,5%
	100	96.076	77.623	19,2%
S1-20-C 0,047 N/mm ²	50	154.609	153.502	0,7%
	75	146.931	173.269	17,9%
	100	120.456	108.025	10,3%

Observa-se, por meio da Tabela 5.31, que a diferença percentual entre os valores do parâmetro da energia total obtido na posição de leitura de 100 mm para a condição de fenda plenamente preenchida e no concreto íntegro, variou de 0,7% a 258,1%. Isso ilustra a dificuldade em se utilizar

o sinal obtido na região de concreto íntegro como referência pois poucas foram as situações em que o valor do parâmetro esteve próximo ao do valor obtido para a fenda completamente preenchida, e, portanto, utilizar o sinal como referência pode prejudicar a interpretação do real preenchimento da fissura. Ressalta-se que para os demais parâmetros observou-se comportamentos similares.

Acredita-se que esse efeito esteja relacionado à atenuação do sinal devido à característica interna do concreto, que ao ser realizada a leitura em outra face do prisma, alterou o comportamento do sinal. Conforme mencionado no subcapítulo 5.1.2.6, peças com mesma geometria e composição do concreto apresentam sinais diferentes. Desta forma, ao contrário dos resultados obtidos por Aggelis, Shiotani e Polyzos (2009), constata-se que as leituras não serviram como referência para os casos estudados. Salienta-se que os autores fizeram uso de ondas de Rayleigh em uma região íntegra na mesma superfície do dano com profundidades de até 23 mm. Portanto, acredita-se que o uso de leituras realizadas na mesma superfície possa reduzir a influência da atenuação do sinal e servir como referência.

No presente trabalho, às dimensões dos prismas não permitiram a realização de leituras na mesma face em que foram induzidas as fendas e, portanto, essa análise não pôde ser realizada. Ainda que a técnica tenha sido sensível ao preenchimento, torna-se necessário a obtenção do sinal que sirva como referência para aplicações práticas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo da dissertação foi analisar a sensibilidade dos parâmetros associados ao sinal ultrassônico na avaliação da integridade do preenchimento do sistema epóxi em aberturas superficiais em estruturas de concreto

Para isso foi preparado um programa experimental com prismas de concreto e fendas induzidas com geometrias previamente conhecidas para que a aplicação da resina fosse realizada de forma gradual, com aquisição dos sinais ultrassônicos entre cada preenchimento. Foram utilizados 2 transdutores, um com frequência de transmissão de 54 kHz (com duas pressões de acoplamento) e outro com frequência 200 kHz (1 pressão de acoplamento).

A primeira observação é que ao se fixar a pressão exercida pelos transdutores, a variação no sinal, e conseqüentemente em seus parâmetros, é nula, sendo isso importante para análises comparativas pois extingue o efeito da força do operador.

A etapa inicial da análise com o ultrassom esteve relacionada à detecção da fenda e obtenção da velocidade de propagação indireta do concreto, de acordo com a BS 1881 e NBR 8802 (ABNT, 2013) além da estimativa da profundidade dos danos por meio de 4 modelos, Bungey *et. al* (2006), BS 1881 (1986) e o Método A e B (PINTO *et. al*, 2010). A detecção da fenda ficou mais visível a medida que a profundidade da fenda aumentou, enquanto que a velocidade calculada para o modo de leitura indireto no concreto esteve dentro dos resultados esperados, conforme critério da BS 1881 (1986); já a estimativa da profundidade da fenda foi mais precisa ao se utilizar o Método A (PINTO *et. al*, 2010) e, portanto, esse foi o padrão de leituras escolhido para a obtenção dos sinais.

Os parâmetros analisados para verificação da sensibilidade da detecção parcial do preenchimento com o epóxi foram: tempo de propagação da onda; amplitude máxima; energia total; janelas de tempo – T25, T50, T75, TC e a energia acumulada. Dada a elevada quantidade de dados, elaborou-se uma rotina computacional por meio de planilhas automatizadas para a obtenção dos parâmetros do sinal.

Após as aplicações de resina verificou-se que o tempo de propagação da primeira onda, tanto com o transdutor de 54 kHz quanto para o de 200 kHz, não foi um parâmetro sensível para diferentes percentuais de preenchimento, de modo que os valores pouco se alteraram para as diferentes aplicações. Essa constatação está de acordo com os resultados obtidos por Medeiros (2007).

Por outro lado, a energia total e a amplitude máxima do sinal foram parâmetros sensíveis em todos os prismas que utilizaram o transdutor de 54 kHz, em especial para a posição de leitura de 100 mm, de modo que conforme se aumentou o preenchimento maiores foram os valores obtidos no sinal. Pôde-se observar que o aumento na pressão de acoplamento dos transdutores de 54 kHz, provocou uma elevação na quantidade de posições de leitura sensíveis a esses parâmetros, já que a transferência de energia entre o transdutor e o concreto foi maior em virtude do menor volume de ar no acoplamento. Desta forma, considera-se que o uso de pressão maior melhorou a sensibilidade do ensaio.

As janelas de tempo foram sensíveis apenas para as leituras realizadas com o transdutor de 200 kHz, nas resinas A e B e acredita-se que isso está relacionado ao fato que frequências maiores se tornam atenuadas mais rapidamente que os as frequências menores, conforme mencionado por Costa (2004). Assim, para análise do sinal, verificou-se que o transdutor de 200 kHz, em especial na posição de 200 mm, permite o uso dos gráficos da energia acumulada para verificação do comportamento do sinal para os diferentes preenchimentos, com destaque para região entre 50 e 100% do acúmulo de energia.

O parâmetro TC também foi sensível à detecção para as leituras dos prismas preenchidos com epóxi A, apresentando potencial para uso em outras análises de danos em estruturas de concreto.

Com relação ao uso de resinas com diferentes propriedades, considera-se que o epóxi com maior coeficiente de transmissão apresentou maiores percentuais de posições sensíveis a amplitude máxima e energia, já o epóxi com maior coeficiente de reflexão teve maiores percentuais de posições sensíveis às janelas de tempo.

Em resumo, considera-se que a posição de leitura de 100 mm obteve os melhores resultados para as análises utilizando os parâmetros de amplitude máxima e energia total e a posição de 200 mm obteve a melhor visualização do gráfico de energia acumulada; a profundidade dos prismas não apresentou influência no experimento, já que foi possível a detecção do preenchimento parcial em todas as profundidades analisadas.

Por fim, com base nas análises pôde-se verificar que ainda que os prismas possuam características externas idênticas (mesma geometria, composição do concreto, condição de cura, adensamento) o sinal obtido não será necessariamente semelhante, possivelmente devido a heterogeneidade interna do concreto que provoca diferentes atenuações do sinal. Desta forma, ao se efetuar a análise, deve-se ter como referência a própria amostra, de modo que o comportamento do sinal é bastante influenciado pela característica interna do material. Assim sendo,

efetuou-se leituras na face oposta à aplicação da resina nos prismas, região com concreto íntegro, para que servissem de referência para um sinal com a fenda plenamente preenchida.

O sinal obtido na região de concreto íntegro não serviu como referência para um sinal obtido em uma superfície com a fenda plenamente preenchida com epóxi, já que a variação existente entre os valores dos parâmetros de análise foi elevada para diversos prismas e, desta maneira, em uma análise prática o uso desse sinal como referência prejudica a interpretação do real preenchimento da fenda. Possivelmente esse efeito esteja relacionado ao uso de uma superfície diferente da de aplicação da resina que provocou diferentes atenuações, e, portanto, acredita-se que o uso de leituras realizadas na mesma superfície possa reduzir a influência da atenuação do sinal e servir como referência para aplicações práticas.

Ainda que com esta pesquisa tenha sido possível melhor compreender o comportamento do sinal ultrassônico para detecção de preenchimentos parciais de epóxi em fendas de concreto, de modo a se identificar parâmetros sensíveis à análise, considera-se que para o uso da técnica em uma aplicação prática, deve-se aprimorar o entendimento dos parâmetros estudados, com situações encontradas nas edificações, além de ser necessário obter um sinal de referência para que seja possível comparar o sinal após a aplicação de epóxi com o sinal correspondente.

6.1.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir serão listadas algumas sugestões para a pesquisas futuras que podem complementar o estudo realizado:

- Efetuar a avaliação do preenchimento das fendas utilizando os parâmetros do domínio da frequência;
- Moldar prismas com dimensões que permitam várias posições de leitura no concreto íntegro na mesma superfície de aplicação da resina para verificar se os parâmetros do sinal no concreto são podem ser utilizados como referência para a energia do sinal do concreto tratado;
- Tratar fissuras provenientes de ensaios de flexão com epóxi para obter o sinal ultrassônico antes e depois do tratamento e então comparar com a extração de testemunho para verificar o percentual de preenchimento.
- Utilizar armadura nos prismas de concreto para avaliar como a técnica é interferida pelas barras de aço;

- Avaliar evolução do sinal obtido com o preenchimento de uma resina epóxi do primeiro ao sétimo dia de cura do material, para verificar o comportamento do sinal durante o tempo de cura da resina.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2013.

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

_____. **NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ACI COMMITTEE **224.1. Causes, evaluation, and repair of cracks in concrete structures**, American Concrete Institute, ACI 224.1R-07, 2007.

_____. **224. Control of Cracking in Concrete Structures**, American Concrete Institute, ACI 224.R-01, 2008.

_____. **228. Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures**, American Concrete Institute, ACI 228.2R-13, 2013.

_____. **503. Use of epoxy compounds with concrete**, American Concrete Institute, ACI 503.R, 2008.

_____. **E706. Crack repair by gravity feed with resin**, American Concrete Institute; ACI RAP-2, 2009.

AGGELIS, D. G., e SHIOTANI, T. (2007). Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements. **Cement and Concrete Composites**, 29(9), 700–711, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.05.001>

AGGELIS, D.G; SHIOTANI, T. Effect of inhomogeneity parameters on wave propagation in cementitious material. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 2, 2008.

- AGGELIS, D.G., MOMOKI, S., & CHAI, H. (2009). Surface wave dispersion in large concrete structures. **NDT & E International**, 42(4), 304–307, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.12.004>
- AGGELIS, D. G., SHIOTANI, T., e POLYZOS, D. Characterization of surface crack depth and repair evaluation using Rayleigh waves. **Cement and Concrete Composites**, 31(1), 77–83, 2009.
- AGGELIS, D.G; Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters. **Mechanics Research Communications**, 38(3), 153–157 2011. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2011.03.007>
- AGGELIS, D.G.; HADJIYANGOU, S.; CHAI, H. K.; MOMOKI, S; SHIOTANI, T. Longitudinal waves for evaluation of large concrete blocks after repair. **NDT and E International**, 44(1), 61–66, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.09.007>
- AGGELIS, D. G. Damage characterisation of inhomogeneous materials: experiments and numerical simulations of wave propagation. **Strain**, v. 47, n. 6, p. 525-533, 2011.
- AGGELIS, D. G.; LEONIDOU, E.; MATIKAS, T. E. Subsurface crack determination by one-sided ultrasonic measurements. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 2, p. 140–146, 2012.
- AGGELIS, D.G., e PAIPETIS, A. S. Monitoring of resin curing and hardening by ultrasound. **Construction and Building Materials**, 26(1), 755–76, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.084>
- AGGELIS, D. G.; CHAI, H. K.; SHIOTANI, T. Elastic Waves on Large Concrete Surfaces for Assessment of Deterioration and Repair Efficiency. **INTECH Open Access Publisher**, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.09.008>
- AHMAD, S., ELAHI, A., BARBHUIYA, S., & FAROOQI, Y. Repair of cracks in simply supported beams using epoxy injection technique. **Materials and Structures**, 46(9), 1547–1559. 2013. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9996-x>

ANDRADE, J. J. O. Propriedades dos polímeros. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon 2ª Ed. 2007, vol. 2, 1323 - 1350.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom: manual de aspectos básicos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos, 2016.

ANTONACI, P; BOCCA, P.G; MASERA, D; PUGNO, N.M; SCALERANDI, M; SELLONE, F. A novel ultrasonic technique to detect damage evolution in quasi-brittle materials. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications, Switzerland. p. 633-638. 2007

ARMITAGE, P. R. **New ultrasonic methods for detecting damage in metals and composite materials**. 185 p. Tese de Doutorado. Universidade de Exeter, Inglaterra, Exeter, 2009.

BOSHOF, W P.; COMBRINCK, R. Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 48, p. 34-39, 2013.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. BS 1881: Part 203: 1986: **Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete**. BS: London, 1986.

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S.G.; GRANTHAM, M.G. **Testing of Concrete in Structures**. New York: Taylor & Francis, - 4ª Ed., 2006.

CARELLI, J.M. **Análise do comportamento de ondas ultrassônicas em elementos fissurados de concreto e argamassa**. 2014. 205 p.. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

COSTA, R.M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do VPU**. 225p. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004

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**. 1988 220 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1988.

FIGUEREDO, E.J.P. **Metodologia de avaliação de sistemas epóxi destinados à injeção de fissuras passivas das estruturas de concreto**. 1989. 120p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

GARCIA, M. **A la fissuración y suas causas**. In: Curso de estudios mayores de la construcción – Cemco 88, Madrid, Instituto Eduardo Torroja, 1983.

GOLLOP, R. S.; TAYLOR, H. F. W. Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. V. Comparison of different slag blends. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 7, p. 1029-1044, 1996.

GRAFF, Karl F. **Wave motion in elastic solids**. Courier Corporation, 1975.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon 2ª Ed. 2007, vol. 2, 945 – 1022,

HELENE, P.; PEREIRA, F. **Manual de Reabilitação de Estruturas de Concreto, Reparo, Reforço e Proteção**. São Paulo: Red Reabilitar, 2003.

HELLIER, C. **Handbook of nondestructive evaluation**. Nova Iorque: McGraw-Hill Education; 2ª Ed.: 2012, 7.11 – 7.12.

HAUWAERT, A.V.; THIMUS, J.F.; DELANNAY, F. Use of ultrasonics to follow crack growth. **Ultrasonics**, v. 36, p. 209–217, 1998.

HOBBS, D. W. Concrete deterioration: causes, diagnosis, and minimising risk. **International Materials Reviews**, 2013.

HOFFMAN, M.A. **Atenuação da energia do sinal ultrassônico na detecção de danos por fissuração no concreto**. 2015. 140 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

HOLT, E.; LEIVO, M. Cracking risks associated with early age shrinkage. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 521-530, 2004.

IRIE, H; YOSHIDA, Y; SAKURADA, Y; ITO, T. Non-destructive-testing methods for concrete structures. **NTT Technical Review**, v. 6, n. 5, p. 1-8, 2008.

ISSA C.A, DEBS P. Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete. **Construction and Building Materials**, v.21, n. 1, p. 157-163, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.030>

JOISEL, A. **Fissuras y grietas em morteiros y hormigones: suas causas y remédios**. Barcelona, Ed. Tecnicos Asociados, 1981.

JUAREZ, C. A.; FAJARDO. G; MONROY, S.; DURAN-HERRERA, A; VALDEZ, P.; MAGNIONT, C. Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement-based composite. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 164-170, 2015.

KARAIKOS, G; DERAEMAERKER, A.; AGGELIS, D.G.; VAN HEMELRIJCK, D. Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method. **Smart Materials and Structures**, v. 24, n. 11, p. 113001, 2015.

KASAI Y, YOKOYAMA K, MATSUI I. Mechanical behaviour of materials. **Society of Materials Science**, Japan, 1972.

KEE, S.H; ZHU, J. Surface wave transmission across a partially closed surface-breaking crack in concrete. **ACI Materials Journal**, v. 111, n. 1, p. 35–46, 2014.

KRUGER M. Scanning impact–echo techniques for crack depth determination. **Otto Graf J**: 16:245–57, 2005.

KINSLER, L.E.; FREY, A.R.; COPPENS, A.B.; SANDERS, J.V. **Fundamentals of acoustics**. Nova Jersey Wiley 4th Ed. 1999

LATHI, B.P., **Sinais e Sistemas Lineares**. Artmed® Editora S.A, 2nd ed., Porto Alegre, 2007.

- MEDEIROS, A. **Aplicação do ultrassom na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado**. 2007. 180 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: ibracon. – 2ª Edição, 2008
- MINORU, K., TOSHIRO, K., YUICHI, U., & KEITETSU, R. Evaluation of bond properties in concrete repair materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 98–105. 2001.
- NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S. The ultrasonic pulse velocity method. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. Florida: CRC Press LLC, - 2ª Ed., Cap. 8, 2004.
- NEVILLE, A M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini – 5ª ed, 2015.
- NEVILLE, A.M. **Tecnologia de concreto**. Porto Alegre: Pini - 2ª ed, 2013.
- OWINO, J. O., & JACOBS, L. J. Attenuation measurements in cement-based materials using laser ultrasonics. **Journal of Engineering Mechanics**, 125(6), 637–647, 1999.
- PINTO, R. C. D. A., MEDEIROS, A., PADARATZ, I. J., & ANDRADE, P. B. Use of Ultrasound to Estimate Depth of Surface Opening Cracks in Concrete Structures. **Ndt Net**. 2010.
- PHILIPPIDIS, T. P., & AGGELIS, D. G. (2005). Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete, **Ultrasonics**, 43, 584–595, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.12.001>.
- PRICE, W. H. Control of Cracking of Concrete During Construction. **Concrete International**, v. 4, n. 01, p. 40-43, 1982.
- PROCEQ. Pundit Lab: instruções operacionais. 2011.

QI, C. **Quantitative assessment of plastic shrinkage cracking and its impact on the corrosion of steel reinforcement**. 2003. 130 p. Tese de Doutorado. Purdue University, 2003

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

SEARS, F. W., ZEMANSKY, M. W., FREEDMAN, R. A., & YOUNG, H. D. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. São Paulo: Addison Wesley - 12^a ed., 2008.

SELLECK, S.F.; LANDIS, E.N.; PETERSON, M.L.; SHAH, S.P.; ACHENBACH, J.D. Ultrasonic investigation of concrete with distributed damage. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 1, p. 27–36, 1998.

SHASH, A. A. Repair of concrete beams - A case study. **Construction and Building Materials**, 19(1), 75–79. 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.024>

SHIOTANI, T; AGGELIS, D.G. Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage. **Materials and Structures**, v. 42, n. 3, p. 377-384, 2009. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9388-4>

SHIOTANI, T.; AGGELIS, D.G. Determination of surface crack depth and repair effectiveness using Rayleigh waves. **Fracture mechanics of concrete and concrete structures—design, assessment and retrofitting of RC structures**. Taylor & Francis, London, UK, p. 1011-1018, 2007.

SHIN, H. C., MIYAUCHI, H., & TANAKA, K. An experimental study of fatigue resistance in epoxy injection for cracked mortar and concrete considering the temperature effect. **Construction and Building Materials**, 25(3), 1316–1324. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.013>

SLOWIK, V.; SCHMIDT, M.; VILLMANN, B. Capillary shrinkage cracking—Experiments and numerical simulation. In: **Fracture mechanics of concrete and concrete structures. Proceedings of the 7th**

international conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures (FraMCoS-7). p. 739-44. 2010

SOUZA, V. C. M; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

STROH, J.; SCHLEGEL, M.C.; IRASSAR, E.F.; MENG, B.; EMMERLING, F. Applying high resolution SyXRD analysis on sulfate attacked concrete field samples. **Cement and Concrete Research**, v. 66, p. 19-26, 2014.

THOMSON, M. **Ultrasonic Non-Destructive Testing of Fibre Reinforced Composites**. 2012. Tese de Doutorado. Victoria University of Wellington.

TURGUT, P.; KUCUK, O. F. Comparative relationships of direct, indirect, and semi-direct ultrasonic pulse velocity measurements in concrete. Russian. **Journal of Non-destructive Testing**, 42(11), 745–751. 2006 <https://doi.org/10.1134/S1061830906110064>

TSANGOURI, E.; KARAIKOS, G.; AGGELIS, D.; DERAEMAERKER, A.; HEMELRRIJCK, D.V.; Crack sealing and damage recovery monitoring of a concrete healing system using embedded piezoelectric transducers. **Structural Helth monitoring**, v.14, p. 462 – 474, 2015.

VIANA, A. C. C. **Comportamento de ondas ultrassônicas em concreto aquecido até 400°C**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

Wave 2000, **Cyber-Logic**, Inc, NY <<http://www.cyberlogic.org/>>

APÊNDICE A – Caracterização dos agregados

Caracterização do agregado graúdo - Brita 0:

Brita 0 (pedrisco)			
Peneira # (mm)	Massa (g)	% Retida	% Acumulada
25,0	-	-	-
19,0	-	0%	0%
12,5	-	0%	0%
9,5	12,2	1%	1%
6,3	273,1	34%	35%
4,8	305,0	37%	72%
Fundo	224,0	27,5%	100%
Total	814,3	100%	
Módulo de finura			0,74
Diâmetro máximo			6,3 mm
Massa específica			2,62 kg/m ³
Massa unitária solta			1,26 kg/m ³
Massa unitária compactada			1,38 kg/m ³

Caracterização do agregado graúdo - Brita 1:

Brita 1			
Peneira # (mm)	Massa (g)	% Retida	% Acumulada
25,0	-	-	-
19,0	30,7	4%	4%
12,5	339,9	44%	48%
9,5	293,8	38%	86%
6,3	79,4	10%	97%
4,8	23,3	3%	100%
Fundo	1,6	0,2%	100%
Total	768,7	100%	100%
Módulo de finura			1,90
Diâmetro máximo			12,5 mm
Massa específica			2,64 kg/m ³
Massa unitária solta			1,38 kg/m ³
Massa unitária compactada			1,51 kg/m ³

Caracterização do agregado miúdo:

Areia Grossa			
Peneira # (mm)	Massa (g)	% Retida	% Acumulada
9,50	-	0%	0%
6,30	-	0%	0%
4,75	23,80	3%	3%
3,35	27,10	3%	6%
2,36	60,10	7%	13%
1,18	293,40	34%	46%
0,60	247,30	28%	75%
0,30	156,20	18%	92%
0,15	52,40	6%	98%
0,075	10,10	1%	100%
Fundo	3,30	0,4%	100%
Soma	873,70	100%	100%

Módulo de finura	3,27
Diâmetro máximo	3,35 mm
Massa específica	2,58 kg/m ³

APÊNDICE B – Tempo de propagação

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-25-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	47	45	40	39
150	85	81	74	67
200	101	102	98	95
250	128	128	125	119
300	151	149	148	143

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-25-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	47	44	41	40
150	86	74	74	74
200	112	99	99	99
250	130	126	128	127
300	150	148	146	146

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-50-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	59	46	45	44
150	83	73	73	72
200	107	99	97	98
250	132	128	123	123
300	157	146	145	145

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-50-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	52	37	39	38
150	75	74	70	71
200	98	98	95	97
250	124	122	122	127
300	149	146	144	146

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-75-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	65	37	37	37
150	83	73	72	73
200	116	102	96	97
250	148	136	133	134
300	171	161	146	148

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-75-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	69	38	38	38
150	83	81	71	72
200	115	101	96	99
250	140	137	127	128
300	163	160	145	147

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-100-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	78	46	38	38
150	89	75	71	71
200	109	103	98	94
250	134	130	123	122
300	158	153	148	150

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-100-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	66	47	39	42
150	87	83	71	71
200	109	106	96	97
250	132	122	121	121
300	156	154	147	148

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-150-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	56	36	36	37
150	114	73	71	72
200	123	109	106	99
250	145	126	123	123
300	165	159	156	158

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-150-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	91	39	40	41
150	119	72	71	72
200	124	100	95	99
250	155	124	122	123
300	169	148	150	152

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-220-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	67	37	38	38
150	155	71	69	71
200	157	94	93	94
250	177	121	117	120
300	185	157	149	148

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-220-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	67	37	41	40
150	144	69	69	69
200	155	94	92	105
250	176	124	117	119
300	195	150	142	144

Posição (mm)	Tempo de propagação (us) - S1-25-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	54	48	50	52
150	111	110	108	109
200	168	166	168	163
250	155	153	155	153
300	170	155	157	155

Posição (mm)	Tempo de propagação (us) - S1-50-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	62	55	53	55	54
150	101	99	98	98	81
200	109	107	108	106	113
250	150	148	133	136	132
300	171	163	156	154	152

Posição (mm)	Tempo de propagação (us) - S1-75-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	88	56	56	51	56
150	113	84	82	81	107
200	174	160	117	131	332
250	234	198	148	145	248
300	205	163	165	164	271

Posição (mm)	Tempo de propagação (us) - S1-100-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	86	55	55	54	55
150	104	81	80	81	84
200	130	127	114	112	136
250	151	138	142	142	151
300	173	218	172	173	318

Posição (mm)	Tempo de propagação (us) - S1-150-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	120	56	49	55	54
150	162	89	82	83	81
200	418	130	116	113	118
250	208	141	140	139	129
300	336	201	204	204	219

Posição (mm)	Tempo de propagação (us) - S1-220-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	148	48	49	52	50
150	161	126	79	78	77
200	174	180	118	116	115
250	199	174	172	168	170
300	211	181	183	180	179

Posição (mm)	Tempo de propagação (us) - S1-25-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	47	37	37	39
150	71	71	68	69
200	96	96	94	94
250	143	125	119	121
300	143	138	142	139

Posição (mm)	Tempo de propagação (us) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	58	38	37	37	38
150	78	72	70	74	69
200	112	98	97	96	96
250	128	124	123	126	121
300	157	149	147	147	170

Posição (mm)	Tempo de propagação (us) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	56	39	39	38	39
150	86	75	74	73	69
200	106	102	97	98	96
250	149	137	128	130	129
300	170	160	159	160	160

Posição (mm)	Tempo de propagação (us) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	66	37	37	38	40
150	121	70	69	71	71
200	127	94	94	96	97
250	146	119	120	121	122
300	173	156	145	146	147

Posição (mm)	Tempo de propagação (us) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	64	42	41	43	44
150	152	70	71	69	71
200	175	94	95	95	96
250	178	120	121	130	123
300	197	145	144	147	147

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-25-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	45	38	37	38	
150	72	70	68	68	
200	98	95	93	92	
250	134	122	119	119	
300	145	143	143	142	

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-25-3-B (200 kHz - 0,117 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	55	48	49	48	
150	121	80	79	79	
200	133	104	104	118	
250	246	148	153	131	
300	210	167	152	206	

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	46	37	37	36	36
150	77	74	76	74	75
200	102	97	97	98	96
250	127	125	123	125	122
300	167	150	147	149	160

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-50-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	57	55	55	55	49
150	122	85	85	89	80
200	156	127	129	128	106
250	180	143	149	148	130
300	178	172	175	170	171

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	66	38	37	37	41
150	83	75	71	72	69
200	106	99	97	95	96
250	147	137	124	126	128
300	177	160	146	146	148

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	84	54	55	54	46
150	119	94	82	80	82
200	160	131	131	111	118
250	288	159	155	159	151
300	243	165	162	238	197

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	60	37	39	34	37
150	115	69	69	69	68
200	127	95	94	93	94
250	146	121	119	121	119
300	177	145	144	148	146

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-150-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	133	47	48	49	54
150	141	79	73	73	71
200	196	104	104	105	108
250	196	138	128	129	129
300	218	167	158	156	156

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	53	42	41	42	41
150	138	69	70	71	70
200	156	92	93	91	93
250	178	118	121	121	120
300	196	142	143	142	141

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S1-220-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	159	54	50	52	52
150	170	80	79	78	82
200	180	106	104	150	117
250	195	189	136	214	130
300	279	222	187	322	209

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	59	40	39	38	40
150	80	75	74	74	75
200	105	103	99	99	100
250	131	129	125	126	127
300	156	156	149	149	148

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	63	47	44	42	41
150	86	73	70	72	72
200	108	103	94	97	97
250	130	125	120	119	121
300	178	160	146	146	150

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	54	41	37	38	41
150	95	72	69	71	70
200	113	98	93	95	96
250	138	125	122	121	120
300	159	171	144	144	142

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	59	42	38	41	40
150	82	78	72	74	73
200	105	102	98	100	98
250	133	129	125	126	122
300	156	154	149	150	148

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	54	46	43	42	42
150	86	72	69	71	70
200	108	102	94	96	94
250	132	123	119	121	119
300	177	153	146	147	144

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	50	45	38	40	39
150	95	70	69	70	70
200	113	95	93	94	94
250	138	123	123	124	123
300	157	147	145	145	144

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S2-50-20-C (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	66	42	40	41	50
150	90	78	80	84	79
200	119	102	101	105	104
250	145	129	138	154	144
300	277	154	157	168	179

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S2-75-20-C (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	83	53	49	49	50
150	103	83	74	75	80
200	116	108	104	106	117
250	140	134	131	131	140
300	287	272	230	153	175

Posição (mm)	Tempo de propagação (µs) - S2-100-20-C (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	81	51	50	52	48
150	106	81	73	82	89
200	120	106	107	109	114
250	147	161	139	137	150
300	178	269	181	172	174

APÊNDICE C – Energia Total

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-25-3-A (200 kHz - 0.11 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	53.114	57.591	55.803	61.194
150	13.202	13.645	19.937	41.927
200	4.846	4.418	3.374	25.354
250	12.402	5.119	8.873	17.611
300	22.405	36.803	36.297	38.637

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-50-3-A (200 kHz - 0.11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	24.594	26.491	44.447	59.405
150	30.662	13.135	38.551	14.449
200	35.490	11.904	31.273	34.570
250	18.993	15.906	22.444	21.166
300	38.743	32.060	59.412	46.995

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-75-3-A (200 kHz - 0.11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	14.214	55.088	16.228	80.382
150	16.856	31.172	33.421	66.361
200	5.577	5.401	13.374	11.359
250	4.551	5.009	8.808	4.546
300	10.001	12.913	26.717	23.340

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-100-3-A (200 kHz - 0.11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	45.072	24.283	22.534	44.256
150	31.427	44.961	21.228	47.183
200	13.498	23.005	39.518	53.098
250	15.839	27.415	33.144	36.740
300	28.927	16.294	27.708	27.545

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-150-3-A (200 kHz - 0.11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	22.697	18.708	75.561	18.408
150	8.565	13.357	46.332	10.832
200	3.373	12.979	20.294	26.350
250	8.076	45.690	60.889	20.246
300	7.345	35.697	30.139	10.656

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-220-3-A (200 kHz - 0.11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	18.817	72.662	39.845	69.144
150	9.253	10.199	32.170	44.349
200	15.473	6.186	28.005	25.933
250	7.746	13.153	12.763	12.849
300	13.731	22.828	33.225	10.062

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-25-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	9.900	9.477	33.485	35.860
150	8.997	12.095	73.636	33.245
200	15.768	17.449	30.603	34.863
250	4.145	5.605	28.152	41.405
300	12.546	23.059	44.323	57.362

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	43.260	37.687	34.695	31.200
150	24.189	36.152	66.638	107.704
200	3.918	8.138	17.280	30.597
250	26.314	14.550	41.725	39.701
300	6.746	20.721	24.057	42.871

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	2.918	10.157	35.311	36.231
150	7.588	18.752	38.861	42.774
200	9.075	10.318	21.234	29.728
250	2.942	5.010	17.204	8.987
300	8.442	7.754	15.360	8.402

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	14.041	47.634	56.961	71.485
150	17.921	78.790	89.844	58.646
200	32.100	64.901	101.091	66.950
250	27.539	53.787	60.507	54.410
300	22.830	51.696	68.243	65.424

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	20.199	29.314	48.321	51.922
150	6.758	11.259	19.139	34.866
200	5.527	33.155	65.548	40.243
250	8.072	15.686	17.611	22.058
300	23.023	20.083	39.155	34.010

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-25-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	21.121	17.460	34.615	30.481	
150	9.440	14.839	75.047	40.226	
200	6.268	18.469	46.378	32.841	
250	3.298	10.169	25.222	36.297	
300	10.047	26.479	31.663	52.279	

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	27.165	27.340	43.385	49.581	66.470
150	36.824	21.271	7.571	65.325	95.142
200	20.963	27.700	9.279	38.015	64.555
250	32.155	12.360	25.579	40.845	74.955
300	6.046	8.874	41.689	69.473	8.479

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	5.546	14.018	17.287	46.579	90.622
150	28.482	25.028	59.763	126.070	75.577
200	8.816	12.958	13.574	22.941	63.046
250	3.989	6.209	26.323	7.088	16.881
300	3.699	9.724	62.751	8.228	17.388

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	23.553	50.986	70.390	104.999	83.503
150	32.542	45.615	99.090	108.137	33.405
200	30.806	37.597	121.620	48.985	61.423
250	25.774	49.255	97.094	150.398	63.611
300	16.333	52.933	39.418	43.098	51.667

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	20.306	20.742	30.032	55.828	38.956
150	26.675	11.463	33.462	47.480	38.968
200	30.522	22.494	73.251	27.429	46.501
250	15.623	12.744	28.130	41.159	34.200
300	24.267	47.465	66.603	90.939	46.029

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-25-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	46.854	59.500	71.502	116.459	
150	18.917	48.744	38.767	41.073	
200	9.509	55.046	65.818	14.245	
250	5.368	3.955	8.044	17.865	
300	11.011	34.247	44.184	10.395	

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-50-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	65.119	70.584	73.527	95.240	63.171
150	19.690	22.847	26.345	34.396	72.261
200	10.353	17.103	11.712	9.850	42.157
250	10.349	32.849	9.233	8.818	55.108
300	9.140	9.951	18.055	20.598	26.397

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	15.223	55.844	37.733	29.539	87.349
150	9.999	24.966	25.458	25.432	58.202
200	8.566	12.209	14.139	24.471	19.932
250	4.961	8.443	14.881	15.037	12.867
300	11.038	42.966	40.392	10.940	17.805

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-150-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	12.542	55.206	60.218	57.424	31.067
150	36.307	51.220	71.597	83.448	35.777
200	8.670	27.366	36.384	30.501	17.622
250	19.259	31.549	47.057	13.434	34.554
300	20.640	38.552	55.654	10.788	17.213

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S1-220-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	9.258	18.455	27.463	33.666	29.338
150	7.611	13.301	32.513	36.622	33.690
200	16.154	2.470	47.825	9.955	16.637
250	19.736	10.196	36.922	7.604	32.675
300	9.352	9.864	25.252	6.011	16.127

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	29.853	39.578	67.697	96.735	85.752
150	29.435	32.213	68.078	71.979	29.923
200	11.419	9.827	47.754	75.183	30.711
250	23.788	28.101	50.224	68.004	26.728
300	15.589	4.252	23.160	54.050	12.102

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	61.786	60.670	132.678	164.850	169.044
150	50.948	26.054	76.538	49.203	68.561
200	26.180	12.181	105.303	53.869	52.245
250	31.244	32.053	108.541	90.796	59.540
300	14.042	12.783	23.531	54.832	18.755

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	15.035	47.738	79.452	96.076	77.623
150	6.188	22.251	63.450	78.231	68.263
200	8.000	23.080	59.420	73.365	38.269
250	8.179	10.000	16.428	42.703	36.503
300	11.780	11.773	23.745	31.366	41.238

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	41.304	13.940	59.713	154.609	153.502
150	23.178	21.490	68.417	93.644	42.822
200	11.419	14.442	55.842	85.057	34.223
250	23.788	28.062	33.989	77.442	28.610
300	15.589	4.183	14.877	30.467	7.981

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	61.786	73.662	126.235	146.931	173.269
150	50.948	50.286	80.231	59.302	83.460
200	26.180	11.169	89.420	113.925	103.695
250	24.321	33.300	118.614	136.701	87.312
300	16.247	13.105	23.221	41.946	17.461

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	38.430	78.918	91.604	120.456	108.025
150	6.188	46.788	77.657	111.150	103.874
200	8.000	57.229	106.347	156.177	8.949
250	8.179	20.183	19.887	69.658	54.245
300	15.348	22.738	39.995	53.583	77.985

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S2-50-20-C (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	48.906	152.048	56.635	36.842	83.476
150	53.974	71.103	61.549	41.752	48.444
200	21.730	156.165	45.631	30.913	37.213
250	16.199	103.070	15.431	6.895	30.741
300	3.973	7.249	10.422	23.477	19.277

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S2-75-20-C (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	59.100	63.169	115.103	151.144	108.212
150	71.130	104.536	83.797	118.874	58.913
200	57.180	71.514	77.885	84.057	27.772
250	49.749	67.623	58.950	69.762	51.016
300	4.515	7.045	7.390	20.030	15.195

Posição (mm)	Energia Total (V.µs) - S2-100-20-C (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	80.337	103.691	109.286	36.596	39.180
150	19.333	42.776	60.126	65.822	23.691
200	33.225	48.306	21.260	19.472	41.882
250	23.116	10.263	11.069	20.141	17.460
300	20.820	8.514	11.007	10.670	20.271

APÊNDICE D – Amplitude máxima

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-25-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	144	13	208	144
150	16	15	96	113
200	54	12	73	99
250	45	4	144	142
300	19	21	57	234

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-50-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	146	110	337	500
150	114	116	313	202
200	127	28	89	210
250	61	16	92	24
300	63	78	244	180

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-75-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	42	36	126	303
150	80	66	50	313
200	11	19	58	67
250	8	12	32	32
300	11	13	73	106

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-100-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	210	77	167	109
150	75	68	215	197
200	81	39	59	244
250	49	33	95	172
300	80	47	114	81

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-150-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	76	56	35	91
150	22	27	172	52
200	78	20	25	81
250	62	28	72	137
300	47	49	118	92

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-220-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	31	30	51	157
150	17	20	46	35
200	51	70	133	99
250	50	36	54	58
300	69	23	62	79

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-25-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	72	110	231	263
150	14	36	52	31
200	17	47	77	58
250	54	36	18	23
300	55	19	65	152

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-50-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	167	179	319	500
150	129	47	287	194
200	127	75	281	245
250	90	95	78	29
300	88	139	331	351

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-75-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	42	81	103	234
150	75	23	159	457
200	6	18	27	63
250	14	7	44	58
300	14	17	107	120

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-100-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	145	195	161	115
150	238	85	226	408
200	87	98	123	304
250	86	86	182	254
300	113	137	138	134

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-150-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	53	80	40	51
150	19	52	223	30
200	85	45	57	38
250	82	100	129	153
300	47	171	90	88

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-220-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	16	43	68	157
150	26	24	44	37
200	53	60	119	163
250	47	30	56	21
300	31	34	120	123

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-25-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	395	469	500	494	
150	74	79	123	261	
200	19	15	15	176	
250	52	16	37	90	
300	99	172	159	177	

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-50-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	198	270	362	403	500
150	216	84	242	73	407
200	232	56	191	204	159
250	74	54	116	97	56
300	180	151	280	172	22

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-75-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	87	424	187	500	254
150	78	203	222	421	69
200	20	18	66	52	10
250	14	13	26	16	21
300	37	44	92	108	16

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-100-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	180	130	125	285	425
150	116	214	118	292	169
200	60	74	140	227	39
250	57	126	127	148	63
300	104	53	134	112	10

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-150-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	122	106	500	96	65
150	27	48	199	49	27
200	8	41	86	104	72
250	24	165	219	74	262
300	17	121	105	43	76

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-220-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	64	500	302	479	500
150	28	45	140	228	279
200	50	14	121	101	173
250	26	33	34	36	286
300	41	62	92	36	112

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-25-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	35	42	127	155	
150	25	42	200	137	
200	40	59	123	113	
250	14	21	120	132	
300	32	67	141	213	

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	138	158	108	108	373
150	76	112	238	287	304
200	15	22	48	93	248
250	79	49	136	136	279
300	30	68	79	103	20

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	12	37	105	144	500
150	26	123	225	159	264
200	29	32	77	100	194
250	12	14	51	28	63
300	28	21	43	23	46

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	41	146	163	274	273
150	53	270	257	205	128
200	82	201	335	210	221
250	83	137	185	124	133
300	62	154	228	250	117

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	55	80	104	151	115
150	21	28	45	112	156
200	18	133	229	114	160
250	25	43	49	51	82
300	73	56	101	88	107

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	73	47	113	132	
150	35	54	252	165	
200	18	69	156	107	
250	14	35	96	116	
300	22	69	84	194	

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	110	124	143	184	326
150	131	89	19	161	361
200	62	96	22	111	291
250	89	40	62	144	320
300	19	33	141	174	24

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	25	58	73	216	499
150	94	188	378	452	276
200	28	44	41	83	236
250	16	19	77	24	61
300	13	25	257	22	55

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	83	150	203	347	330
150	104	139	343	354	154
200	84	107	386	125	267
250	71	103	299	343	160
300	47	165	100	133	141

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	54	65	72	157	145
150	77	32	88	111	197
200	92	94	299	75	202
250	45	46	88	116	103
300	77	171	196	246	135

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-25-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	372	427	491	500
150	126	301	212	304
200	39	290	500	79
250	16	23	35	100
300	38	131	247	37

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-50-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	358	490	495	500	499
150	116	127	153	182	499
200	36	77	31	44	237
250	32	154	31	26	292
300	24	32	49	84	85

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	94	480	232	203	371
150	53	113	165	246	230
200	28	39	53	143	62
250	11	40	34	60	63
300	34	198	187	42	51

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-150-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	66	380	322	387	263
150	168	240	486	496	270
200	36	102	141	169	117
250	68	104	146	51	179
300	76	147	225	41	73

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S1-220-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	29	116	145	188	248
150	20	92	168	207	254
200	53	5	196	64	110
250	63	28	134	21	168
300	25	32	104	22	68

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	152	201	365	500	388
150	130	188	220	259	128
200	58	60	205	283	138
250	69	98	192	308	90
300	56	18	100	174	44

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	223	244	463	500	500
150	146	105	274	139	268
200	86	30	367	172	253
250	103	79	435	311	274
300	39	53	101	146	69

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	56	274	362	500	403
150	19	99	194	314	222
200	30	91	197	210	204
250	27	26	50	121	182
300	38	40	80	94	164

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	216	69	235	500	183
150	91	103	247	357	194
200	58	77	238	328	180
250	69	75	131	342	94
300	56	18	65	107	31

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	223	295	375	500	489
150	146	138	281	204	397
200	86	27	356	389	537
250	63	121	375	478	410
300	44	47	100	124	71

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	136	429	500	500	386
150	19	166	292	500	378
200	30	224	460	493	53
250	27	55	72	218	298
300	39	70	110	167	323

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S2-50-20-C (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	381	500	500	237	500
150	409	350	500	326	309
200	100	500	409	186	259
250	56	275	72	34	185
300	8	29	39	88	77

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S2-75-20-C (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	388	400	500	500	500
150	413	500	493	500	361
200	262	270	377	500	214
250	235	282	352	361	339
300	13	27	28	66	71

Posição (mm)	Amplitude Máxima (V) - S2-100-20-C (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	500	500	500	296	326
150	89	236	400	456	157
200	150	283	111	68	277
250	105	35	44	103	114
300	61	25	48	41	102

APÊNDICE E – Janelas de tempo (T25; T50; T75; TC)

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-25-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	202	245	237	225	
150	262	298	255	242	
200	264	251	255	239	
250	328	373	236	313	
300	405	328	391	378	

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-50-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	245	225	196	188	212
150	260	299	250	257	306
200	340	292	273	286	382
250	420	346	330	391	353
300	422	385	335	363	411

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-75-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	188	216	291	272	178
150	218	248	305	305	231
200	338	375	385	311	226
250	413	361	432	360	317
300	442	421	401	492	347

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-100-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	196	187	212	245	159
150	283	230	221	203	267
200	334	330	377	322	334
250	447	313	314	327	360
300	443	437	389	480	395

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-150-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	370	223	408	371	248
150	357	338	361	265	186
200	329	327	357	508	223
250	354	474	501	423	269
300	428	423	419	448	377

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-220-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	553	398	445	280	365
150	251	320	422	442	305
200	314	382	383	468	397
250	317	451	448	449	373
300	388	416	433	513	436

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-25-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	222	256	231	166
150	249	206	293	263
200	302	299	253	224
250	324	318	322	355
300	390	329	421	405

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-50-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	252	310	188	184
150	252	290	212	279
200	337	296	264	301
250	385	357	304	354
300	418	370	325	380

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-75-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	198	228	280	229
150	325	230	255	292
200	324	401	432	303
250	399	317	399	369
300	444	467	400	463

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-100-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	254	185	204	299
150	274	247	220	185
200	369	382	331	336
250	441	331	323	253
300	447	427	482	442

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-150-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	371	363	368	388
150	280	360	357	295
200	284	388	398	449
250	364	409	440	450
300	446	405	468	454

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-220-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	492	403	328	307
150	283	286	441	364
200	288	389	382	427
250	333	521	474	485
300	336	430	438	516

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-25-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	180	155	148	130
150	191	186	153	197
200	287	276	224	181
250	251	332	245	247
300	308	259	268	304

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-50-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	183	151	144	146	164
150	187	161	155	181	153
200	233	244	212	233	333
250	282	280	236	264	310
300	328	281	300	301	227

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-75-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	188	147	153	128	148
150	247	194	195	185	204
200	245	287	255	238	269
250	343	351	328	378	304
300	399	364	344	353	278

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-100-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	198	182	182	161	179
150	269	210	202	188	174
200	262	295	242	235	208
250	331	280	293	279	273
300	430	348	320	340	284

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-150-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	204	140	159	165	128
150	311	309	234	270	218
200	451	333	304	307	228
250	398	365	349	353	241
300	391	372	378	337	246

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-220-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	273	119	151	150	106
150	332	231	239	206	163
200	307	394	270	252	261
250	359	379	385	392	332
300	374	401	402	391	457

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-25-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	278	211	310	225
150	293	256	272	241
200	333	369	267	240
250	409	344	274	311
300	357	358	319	382

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	281	240	332	259	170
150	280	281	242	310	242
200	325	366	343	368	204
250	314	289	293	279	242
300	421	401	386	410	342

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-753-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	197	239	294	202	135
150	263	170	174	200	256
200	347	326	311	276	213
250	324	358	378	426	281
300	507	442	410	392	383

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	372	289	298	189	281
150	300	301	282	293	187
200	373	344	362	472	208
250	435	492	499	476	327
300	372	416	410	415	346

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	348	307	440	347	193
150	287	361	369	265	171
200	339	386	339	419	214
250	385	440	461	564	396
300	384	386	417	458	396

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-250-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	262	381	291	226
150	291	258	239	241
200	325	364	306	242
250	366	340	272	314
300	454	396	433	379

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	241	233	290	261	171
150	274	253	327	317	236
200	380	273	353	308	204
250	328	326	359	276	242
300	435	334	409	420	352

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	206	220	252	203	133
150	265	163	166	232	256
200	338	308	269	296	213
250	360	373	333	514	283
300	430	476	361	418	395

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	384	331	307	215	284
150	316	308	309	312	190
200	357	344	368	408	209
250	426	482	455	470	330
300	389	505	439	431	348

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	375	279	343	386	197
150	333	448	338	361	172
200	336	368	348	422	218
250	394	416	435	462	399
300	373	383	423	455	401

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-25-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	148	148	159	122
150	186	197	233	146
200	230	254	187	228
250	285	275	234	262
300	313	291	297	282

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-50-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	189	140	171	181	168
150	216	230	207	199	199
200	272	213	266	245	233
250	311	282	311	313	240
300	386	339	383	301	322

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	177	162	171	156	187
150	236	179	186	162	181
200	294	306	265	237	265
250	302	328	342	321	223
300	375	322	318	262	339

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-150-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	241	137	181	171	133
150	274	245	221	212	171
200	321	313	315	295	219
250	328	355	380	370	252
300	321	361	375	372	272

Posição (mm)	T25 (µs) - S1-220-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	327	163	165	191	135
150	330	205	231	216	170
200	337	707	327	213	221
250	356	319	381	296	251
300	357	340	352	240	281

Posição (mm)	T25 (µs) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)					Concreto
	0%	33%	66%	100%		
100	188	170	159	168	158	
150	250	182	260	226	196	
200	288	235	219	250	180	
250	316	287	253	239	267	
300	441	308	305	372	455	

Posição (mm)	T25 (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)					Concreto
	0%	33%	66%	100%		
100	265	214	200	218	193	
150	377	233	260	323	247	
200	365	439	259	303	209	
250	300	386	247	255	247	
300	403	337	352	407	317	

Posição (mm)	T25 (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)					Concreto
	0%	33%	66%	100%		
100	244	171	201	165	152	
150	310	248	288	239	234	
200	289	242	260	349	189	
250	459	342	326	381	248	
300	470	400	396	396	259	

Posição (mm)	T25 (µs) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)					Concreto
	0%	33%	66%	100%		
100	190	194	160	172	180	
150	316	245	213	218	208	
200	288	235	217	258	183	
250	314	312	251	268	281	
300	441	356	287	387	553	

Posição (mm)	T25 (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)					Concreto
	0%	33%	66%	100%		
100	274	226	203	216	221	
150	377	341	232	256	197	
200	365	347	242	281	182	
250	361	276	239	253	239	
300	418	358	319	351	333	

Posição (mm)	T25 (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)					Concreto
	0%	33%	66%	100%		
100	237	165	183	159	162	
150	310	274	263	242	276	
200	289	254	218	345	21	
250	459	386	306	330	195	
300	498	436	378	389	281	

Posição (mm)	T25 (µs) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,11 N/mm ²)					Concreto
	0%	33%	66%	100%		
100	227	197	115	189	123	
150	192	232	143	183	191	
200	263	241	171	189	187	
250	280	310	224	266	250	
300	467	361	292	321	277	

Posição (mm)	T25 (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,11 N/mm ²)					Concreto
	0%	33%	66%	100%		
100	139	139	167	143	150	
150	176	192	201	200	166	
200	239	251	225	232	207	
250	254	290	244	277	197	
300	301	286	243	310	271	

Posição (mm)	T25 (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,11 N/mm ²)					Concreto
	0%	33%	66%	100%		
100	157	125	125	148	144	
150	278	207	179	171	148	
200	278	235	225	263	165	
250	310	287	283	292	194	
300	399	289	298	317	249	

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-25-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	460	456	417	276
150	450	509	612	575
200	567	585	584	547
250	602	593	798	839
300	672	627	658	534

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-50-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	479	468	356	359
150	458	526	517	528
200	619	639	537	601
250	765	673	676	711
300	686	705	615	684

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-75-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	390	434	453	411
150	571	494	493	553
200	622	582	703	636
250	700	652	621	630
300	751	669	763	662

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-100-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	578	358	409	569
150	617	543	565	524
200	794	699	585	550
250	735	774	528	579
300	709	724	750	780

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-150-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	718	659	669	608
150	591	665	685	648
200	592	672	677	668
250	707	732	690	876
300	709	570	769	860

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-220-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	905	837	649	606
150	634	654	709	669
200	681	763	692	764
250	705	937	941	803
300	681	881	726	837

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-25-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	402	477	479	352
150	453	497	477	464
200	513	520	593	439
250	586	616	462	607
300	663	590	664	583

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-50-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	474	383	428	383
150	520	569	509	500
200	612	617	624	614
250	806	659	739	734
300	699	660	660	655

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-75-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	408	479	480	505
150	547	528	557	579
200	567	628	561	646
250	682	684	699	675
300	717	656	723	706

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-100-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	567	428	448	499
150	654	550	564	540
200	778	638	667	661
250	702	645	553	690
300	811	736	701	780

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-150-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	690	561	697	656
150	665	706	660	616
200	648	624	638	734
250	701	777	797	892
300	817	564	565	883

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-220-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	915	799	689	630
150	609	665	701	750
200	625	722	698	802
250	667	878	931	895
300	686	858	793	767

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-25-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	297	266	237	262
150	324	381	286	313
200	831	1.044	777	371
250	500	855	519	488
300	585	489	500	496

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-50-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	343	270	315	262
150	332	320	333	332
200	456	452	423	411
250	508	545	508	487
300	601	525	540	539

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-75-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	377	250	273	245
150	431	382	360	344
200	690	704	479	471
250	981	930	625	749
300	678	664	540	599

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-100-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	420	408	348	321
150	546	415	432	368
200	581	573	495	449
250	649	533	517	519
300	679	656	588	595

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-150-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	413	348	353	311
150	653	619	454	483
200	1.698	698	646	610
250	836	656	625	636
300	916	676	604	581

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-220-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	569	255	270	287
150	732	528	497	365
200	636	1.040	550	488
250	772	858	710	754
300	733	683	658	717

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-25-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	561	484	508	352
150	700	581	574	462
200	633	696	537	440
250	920	578	506	605
300	692	719	610	589

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	543	444	539	496
150	558	601	599	605
200	511	603	683	628
250	573	558	609	535
300	601	596	652	767

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	386	568	490	360
150	511	430	306	385
200	650	554	452	533
250	593	729	616	641
300	799	815	645	731

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	875	518	735	389
150	713	595	700	601
200	762	623	679	719
250	716	811	706	793
300	787	761	776	691

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	773	645	762	723
150	506	711	609	648
200	599	733	686	762
250	766	827	786	971
300	615	741	644	921

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-25-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	486	703	495	353	
150	587	578	439	463	
200	614	773	329	442	
250	640	589	553	608	
300	800	704	794	586	

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	525	452	583	528	407
150	530	407	652	690	522
200	639	515	663	583	515
250	556	678	740	538	434
300	676	677	559	747	583

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	445	521	456	361	269
150	539	355	297	390	501
200	679	648	694	525	544
250	607	658	630	669	535
300	664	739	518	741	740

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	743	704	684	406	616
150	660	617	646	654	457
200	722	715	718	773	469
250	765	911	692	770	627
300	763	739	811	802	652

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	838	619	644	803	467
150	686	695	554	666	451
200	595	751	731	660	483
250	736	817	754	881	658
300	609	649	732	851	701

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-25-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	287	270	278	202	
150	364	388	374	277	
200	523	486	390	422	
250	674	466	476	503	
300	660	537	490	539	

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-50-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	328	233	346	324	291
150	435	398	378	358	344
200	622	428	521	485	460
250	636	523	648	612	463
300	715	634	636	572	598

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	358	281	300	266	375
150	460	377	351	347	464
200	579	549	525	463	484
250	835	653	554	609	443
300	732	562	567	540	567

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-150-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	497	293	310	281	244
150	546	466	426	380	367
200	629	532	581	481	431
250	572	643	654	664	468
300	613	631	636	646	545

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-220-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	699	360	312	388	246
150	761	442	432	427	366
200	636	1.856	602	429	432
250	684	596	644	643	467
300	765	664	618	562	535

Posição (mm)	T50 (µs) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	475	361	333	397	326
150	543	415	450	474	375
200	510	444	378	420	348
250	606	476	481	536	576
300	645	517	521	638	726

Posição (mm)	T50 (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	583	390	346	513	408
150	715	599	528	515	421
200	753	691	496	548	383
250	708	831	478	508	489
300	696	540	744	683	498

Posição (mm)	T50 (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	559	409	549	418	404
150	675	593	640	536	458
200	562	639	585	539	508
250	719	638	552	636	525
300	766	645	597	642	558

Posição (mm)	T50 (µs) - S2-500-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	432	399	325	355	326
150	547	486	443	560	487
200	510	379	339	494	403
250	604	588	464	541	546
300	645	543	483	639	851

Posição (mm)	T50 (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	592	415	331	543	497
150	715	646	430	466	385
200	753	700	495	516	338
250	756	528	471	503	472
300	675	675	632	596	529

Posição (mm)	T50 (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	425	416	547	397	426
150	675	553	592	528	483
200	562	538	438	692	72
250	719	640	520	629	473
300	881	697	678	652	627

Posição (mm)	T50 (µs) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,11 N/mm²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	360	417	230	310	249
150	350	509	243	332	334
200	493	412	314	386	381
250	556	587	422	566	458
300	1.357	558	516	633	540

Posição (mm)	T50 (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,11 N/mm²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	326	310	294	257	256
150	342	355	326	337	319
200	478	508	440	436	398
250	559	545	451	500	390
300	986	629	608	564	549

Posição (mm)	T50 (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,11 N/mm²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	343	243	270	250	252
150	588	378	318	382	311
200	492	470	422	547	389
250	579	627	480	435	488
300	738	644	578	636	524

Posição (mm)	T75(μs) - S1-25-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	771	864	904	687
150	818	936	809	804
200	905	892	961	761
250	1.004	979	955	1.021
300	1.033	927	972	984

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-50-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	838	744	864	817	945
150	1.023	1.026	953	1.057	1.023
200	1.024	1.055	1.126	1.141	939
250	1.250	1.102	1.046	1.053	1.053
300	1.079	1.180	1.081	1.142	1.136

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-75-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	829	923	1.052	951	695
150	1.017	1.000	1.004	956	869
200	926	1.185	991	1.064	794
250	1.103	1.172	1.212	1.166	1.213
300	1.138	1.200	1.131	1.244	1.166

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-100-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	1.015	899	857	979	971
150	1.208	1.112	915	1.071	971
200	1.374	1.249	1.157	1.072	958
250	1.316	1.256	1.129	1.328	1.056
300	1.445	1.212	1.124	1.269	1.287

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-150-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	1.188	975	1.003	1.127	952
150	1.178	1.186	1.199	1.135	800
200	1.218	1.142	1.062	1.220	880
250	1.228	1.323	1.285	1.374	1.004
300	1.280	1.041	1.090	1.420	1.184

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-220-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	1.420	1.428	1.282	1.267	1.142
150	1.203	1.280	1.077	1.135	1.056
200	1.141	1.331	1.313	1.382	1.386
250	1.292	1.521	1.498	1.435	1.132
300	1.286	1.371	1.276	1.557	1.176

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-25-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	871	831	868	651
150	838	1.125	938	900
200	927	1.048	1.001	863
250	940	997	1.257	1.139
300	1.011	1.214	1.010	893

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-50-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	784	856	814	887	670
150	986	923	958	1.012	735
200	1.032	1.041	1.066	1.069	978
250	1.208	1.038	1.005	1.264	1.091
300	1.080	1.124	1.032	1.201	1.364

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-75-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	729	844	1.063	892	576
150	1.024	990	1.019	891	836
200	1.048	1.056	1.159	1.132	1.255
250	1.067	1.019	1.193	1.126	981
300	1.214	1.149	1.193	1.180	1.332

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-100-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	1.138	822	818	1.097	1.014
150	1.180	1.077	920	1.092	956
200	1.438	1.161	1.236	1.004	1.044
250	1.370	1.450	1.086	1.259	975
300	1.282	1.260	1.082	1.319	1.141

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-150-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	1.303	1.116	969	1.270	865
150	1.127	1.296	1.186	1.262	928
200	1.111	1.108	1.292	1.217	1.215
250	1.256	1.395	1.255	1.367	1.117
300	1.185	1.086	1.255	1.395	1.151

Posição (mm)	T75 (μs) - S1-220-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				Concreto
	0%	33%	66%	100%	
100	1.343	1.487	1.233	1.321	900
150	1.231	1.294	1.107	1.082	796
200	1.153	1.404	1.306	1.300	1.298
250	1.262	1.646	1.532	1.465	1.197
300	1.373	1.367	1.336	1.562	1.289

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-25-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	486	468	458	485
150	695	785	588	590
200	2.635	2.850	2.623	713
250	1.057	2.555	1.069	979
300	1.004	871	922	890

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-50-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	634	521	612	472
150	597	713	617	691
200	791	1.079	828	751
250	981	1.039	903	901
300	1.081	946	914	939

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-75-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	696	448	604	468
150	837	650	713	688
200	2.272	2.396	1.053	984
250	2.640	2.555	1.294	1.983
300	1.414	1.261	987	1.108

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-100-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	896	943	810	642
150	1.044	817	915	734
200	1.231	1.099	993	839
250	1.248	1.118	1.050	1.034
300	1.241	1.197	1.035	1.077

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-150-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	979	772	739	628
150	1.525	1.325	923	962
200	3.096	1.544	1.319	1.255
250	1.770	1.137	1.095	1.056
300	1.928	1.189	1.203	1.204

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-220-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	1.177	609	618	543
150	1.621	1.254	918	775
200	1.221	2.247	1.049	953
250	1.799	1.537	1.350	1.520
300	1.337	1.154	1.150	1.496

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-25-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	1.218	912	908	687
150	1.383	1.012	863	802
200	1.125	1.106	1.030	762
250	2.700	949	1.003	1.019
300	1.277	1.135	1.136	988

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	987	696	988	1.072
150	1.041	1.037	1.006	944
200	872	992	1.015	1.123
250	976	1.054	1.147	930
300	1.089	984	1.286	1.023

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	836	1.152	775	928
150	1.089	849	725	897
200	1.199	1.076	1.034	874
250	1.027	1.405	1.048	1.020
300	1.410	1.458	1.067	1.171

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-100-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	1.719	926	1.163	891
150	1.489	1.094	1.285	1.046
200	1.398	1.116	1.218	1.101
250	1.302	1.459	1.229	1.293
300	1.430	1.348	1.130	1.090

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	33%	66%	100%
100	1.348	1.207	1.296	1.256
150	1.044	1.244	1.222	1.171
200	957	1.153	1.146	1.256
250	1.291	1.428	1.321	1.469
300	1.102	1.350	1.201	1.530

Posição (mm)	T50 (µs) - S1-25-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	838	970	851	688	
150	1.017	1.004	744	803	
200	1.119	1.328	993	764	
250	1.040	999	1.077	1.021	
300	1.205	1.161	1.224	985	

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.022	829	1.114	1.093	888
150	993	1.030	1.207	1.024	836
200	1.035	1.079	1.121	1.181	964
250	979	1.185	1.213	922	833
300	1.075	1.257	1.005	1.017	1.051

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	833	1.060	891	912	634
150	1.080	908	790	842	888
200	1.182	1.212	1.298	841	832
250	1.062	1.123	1.112	1.039	947
300	1.059	1.220	1.092	1.110	1.139

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.298	1.113	1.149	963	958
150	1.299	1.197	1.185	994	978
200	1.371	1.170	1.163	1.042	967
250	1.357	1.505	1.224	1.279	1.037
300	1.556	1.173	1.282	1.377	1.084

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.539	1.259	1.164	1.265	927
150	1.071	1.181	1.108	1.247	1.031
200	1.020	1.203	1.129	1.174	1.047
250	1.154	1.482	1.299	1.448	1.238
300	1.006	1.109	1.257	1.376	1.032

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-25-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	501	516	500	450
150	736	814	686	572
200	1.237	875	764	900
250	2.225	808	951	868
300	1.252	1.014	890	1.215

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-50-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	597	514	554	596	543
150	942	714	782	835	652
200	1.308	852	964	1.041	894
250	1.460	923	1.336	1.336	865
300	1.261	1.082	1.210	1.041	1.041

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	838	573	588	526	767
150	1.040	744	662	659	974
200	1.489	1.351	1.119	876	925
250	2.418	1.329	1.150	1.314	1.048
300	1.439	965	930	1.042	1.049

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-150-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.025	578	632	605	452
150	1.014	857	844	707	746
200	1.367	960	1.027	899	799
250	1.172	1.179	1.118	1.124	858
300	1.156	1.107	1.067	1.234	998

Posição (mm)	T75 (µs) - S1-220-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.548	770	595	869	454
150	1.776	1.016	864	917	745
200	1.278	3.325	1.034	1.013	801
250	1.176	1.172	1.131	1.234	857
300	1.516	1.249	1.157	1.471	1.007

Posição (mm)	T75 (µs) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	978	733	696	709	687
150	1.066	736	743	866	799
200	779	863	693	896	787
250	1.068	868	785	1.028	928
300	1.048	947	915	1.021	1.156

Posição (mm)	T75 (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.132	941	780	1.007	748
150	1.122	1.240	932	990	912
200	1.302	1.193	945	1.169	891
250	1.153	1.326	916	1.088	880
300	1.248	1.101	1.071	1.077	1.086

Posição (mm)	T75 (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.224	847	883	839	886
150	1.127	1.058	948	901	834
200	1.065	1.124	1.006	1.115	1.014
250	1.204	1.068	975	1.054	906
300	1.286	1.054	1.143	1.104	878

Posição (mm)	T75 (µs) - S2-500-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	952	818	618	665	722
150	998	885	757	913	926
200	779	745	598	920	796
250	1.067	970	809	960	815
300	1.048	907	819	1.102	1.460

Posição (mm)	T75 (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.141	884	751	1.022	873
150	1.122	1.217	926	994	924
200	1.302	1.162	968	1.128	807
250	1.366	1.126	972	1.001	788
300	1.247	1.192	918	1.023	1.255

Posição (mm)	T75 (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	891	781	901	828	970
150	1.127	1.062	924	928	919
200	1.065	1.044	878	1.204	120
250	1.204	1.117	834	1.040	815
300	1.513	1.230	1.190	1.033	909

Posição (mm)	T75 (µs) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	687	846	419	653	444
150	673	902	504	642	573
200	951	803	610	740	687
250	1.115	995	892	1.262	884
300	2.940	973	1.032	977	951

Posição (mm)	T75 (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	672	602	517	516	452
150	644	668	600	635	579
200	869	952	791	786	827
250	1.088	1.016	843	879	840
300	2.588	1.748	1.894	945	1.098

Posição (mm)	T75 (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	685	467	468	517	484
150	1.125	725	580	678	677
200	949	856	846	1.027	804
250	1.162	1.301	970	901	959
300	1.316	1.510	1.146	1.114	962

Posição (mm)	TC (µs) - S1-25-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	659	709	754	600
150	626	698	706	684
200	687	741	831	631
250	775	811	731	822
300	838	818	874	800

Posição (mm)	TC (µs) - S1-50-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	687	628	701	669	717
150	800	835	757	814	870
200	841	844	864	921	880
250	1.018	849	904	955	853
300	952	961	888	970	933

Posição (mm)	TC (µs) - S1-75-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	645	704	775	757	587
150	770	809	828	795	724
200	717	924	837	904	676
250	883	918	930	947	1.024
300	903	931	933	1.050	981

Posição (mm)	TC (µs) - S1-100-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	781	701	671	762	738
150	948	850	787	845	758
200	1.031	979	943	898	764
250	1.021	968	871	1.022	878
300	1.130	989	916	1.051	940

Posição (mm)	TC (µs) - S1-150-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	903	785	868	905	766
150	915	928	930	912	645
200	922	889	869	1.005	756
250	984	1.030	1.027	1.097	831
300	1.030	877	881	1.087	907

Posição (mm)	TC (µs) - S1-220-3-A (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.146	1.081	1.020	962	915
150	881	965	913	967	839
200	923	1.045	1.015	1.068	1.020
250	996	1.180	1.165	1.137	928
300	1.002	1.086	1.006	1.177	962

Posição (mm)	TC (µs) - S1-25-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	708	764	720	557
150	671	1.014	777	679
200	742	861	839	751
250	767	874	1.087	1.034
300	843	1.024	892	812

Posição (mm)	TC (µs) - S1-50-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	680	664	631	675	503
150	752	712	754	793	647
200	842	833	868	888	838
250	969	865	830	967	867
300	925	901	883	991	1.170

Posição (mm)	TC (µs) - S1-75-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	594	650	745	691	518
150	792	742	802	770	769
200	799	843	912	951	1.033
250	852	804	918	889	749
300	967	916	995	1.014	1.099

Posição (mm)	TC (µs) - S1-100-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	875	655	646	872	875
150	935	882	787	833	631
200	1.060	987	966	843	712
250	1.080	1.079	867	964	735
300	1.070	984	958	1.067	976

Posição (mm)	TC (µs) - S1-150-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	984	902	866	972	967
150	845	1.004	927	955	940
200	869	932	965	994	922
250	981	1.062	1.000	1.099	891
300	966	890	1.018	1.084	853

Posição (mm)	TC (µs) - S1-220-3-A (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.072	1.115	973	982	649
150	904	977	924	908	602
200	925	1.094	1.019	995	903
250	1.025	1.260	1.210	1.122	895
300	1.047	1.133	1.020	1.184	1.060

Posição (mm)	TC (µs) - S1-25-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	486	485	426	454
150	804	818	588	567
200	1.541	1.651	1.502	669
250	958	1.543	948	853
300	873	746	732	747

Posição (mm)	TC (µs) - S1-50-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	651	577	554	459	470
150	593	790	558	697	596
200	707	957	701	667	722
250	857	915	780	782	965
300	856	796	753	749	1.184

Posição (mm)	TC (µs) - S1-75-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	778	463	670	422	490
150	821	652	638	569	806
200	1.400	1.449	897	867	1.724
250	1.577	1.556	1.097	1.378	1.215
300	1.157	1.071	831	949	1.293

Posição (mm)	TC (µs) - S1-100-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	712	789	688	567	457
150	836	701	751	642	648
200	999	983	765	684	1.020
250	1.017	896	801	881	1.024
300	991	1.028	867	873	1.587

Posição (mm)	TC (µs) - S1-150-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	804	762	621	672	652
150	1.183	1.079	767	920	992
200	1.877	1.151	989	1.030	965
250	1.322	931	875	917	706
300	1.339	947	936	1.008	850

Posição (mm)	TC (µs) - S1-220-3-A (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	940	544	585	504	314
150	1.219	1.060	761	658	566
200	1.010	1.504	873	821	709
250	1.300	1.180	1.099	1.209	847
300	1.090	1.004	946	1.172	962

Posição (mm)	TC (µs) - S1-25-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)			
	0%	50%	100%	Concreto
100	1.041	718	734	600
150	1.138	804	759	683
200	966	914	803	631
250	1.626	771	786	820
300	1.069	919	877	804

Posição (mm)	TC (µs) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	786	636	818	774	647
150	811	782	824	770	744
200	755	925	881	872	748
250	815	858	891	775	716
300	856	848	994	848	926

Posição (mm)	TC (µs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	638	912	729	680	540
150	769	733	596	661	721
200	878	911	805	757	700
250	767	1.143	873	829	758
300	1.061	1.153	886	951	926

Posição (mm)	TC (µs) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.355	783	915	713	800
150	1.172	844	950	865	725
200	1.069	909	964	963	708
250	1.080	1.103	1.011	1.071	833
300	1.144	1.015	968	921	879

Posição (mm)	TC (µs) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.035	941	1.053	1.023	755
150	805	975	938	969	767
200	831	967	921	1.096	800
250	1.013	1.139	1.041	1.207	961
300	907	1.038	975	1.186	906

Posição (mm)	TC (µs) - S1-25-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	695	821	721	601	
150	799	813	696	683	
200	871	1.039	793	634	
250	828	852	826	822	
300	1.002	950	969	802	

Posição (mm)	TC (µs) - S1-50-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	809	684	839	808	648
150	796	752	981	805	738
200	843	808	957	867	748
250	803	955	952	763	716
300	843	1.002	849	872	936

Posição (mm)	TC (µs) - S1-75-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	638	860	691	667	538
150	790	714	625	642	721
200	899	966	949	722	700
250	805	1.035	937	861	759
300	895	1.064	887	952	938

Posição (mm)	TC (µs) - S1-150-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.110	893	894	744	803
150	1.010	895	914	877	728
200	1.061	927	964	943	711
250	1.108	1.134	1.007	1.047	836
300	1.228	992	1.026	1.059	881

Posição (mm)	TC (µs) - S1-220-3-B (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.164	942	967	1.067	759
150	897	960	841	1.032	768
200	846	1.024	945	992	804
250	940	1.134	1.022	1.155	964
300	872	928	1.008	1.121	912

Posição (mm)	TC (µs) - S1-25-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	50%	100%	Concreto	
100	484	505	508	391	
150	739	675	624	535	
200	1.057	729	620	845	
250	1.374	709	938	828	
300	1.075	829	731	1.013	

Posição (mm)	TC (µs) - S1-50-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	560	475	540	533	513
150	825	712	684	725	583
200	1.077	779	889	963	754
250	1.134	766	1.058	1.096	704
300	1.042	902	1.056	883	867

Posição (mm)	TC (µs) - S1-75-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	813	551	557	512	620
150	980	744	593	610	774
200	1.147	1.111	899	742	755
250	1.471	1.157	980	1.109	706
300	1.143	829	798	908	794

Posição (mm)	TC (µs) - S1-150-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	930	524	568	527	511
150	824	712	686	607	655
200	1.140	791	830	822	770
250	967	919	915	977	752
300	957	899	876	1.045	882

Posição (mm)	TC (µs) - S1-220-3-B (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	1.190	721	543	824	513
150	1.285	847	733	760	654
200	1.028	2.133	841	893	772
250	983	984	905	1.071	751
300	1.192	1.045	938	1.085	891

Posição (mm)	TC (µs) - S2-50-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	738	617	548	620	591
150	808	650	576	710	616
200	672	665	582	679	636
250	838	729	684	762	773
300	878	773	786	846	1.042

Posição (mm)	TC (µs) - S2-50-20-C (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	627	641	426	598	407
150	597	744	467	555	544
200	830	664	548	642	626
250	947	810	781	1.086	748
300	1.788	824	937	840	855

Posição (mm)	TC (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	893	760	658	787	642
150	921	919	778	789	693
200	975	976	761	873	692
250	900	1.063	731	810	713
300	945	861	882	932	806

Posição (mm)	TC (µs) - S2-75-20-C (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	590	557	486	447	422
150	585	576	550	547	519
200	717	748	638	676	714
250	831	801	704	725	662
300	1.554	1.237	1.267	769	925

Posição (mm)	TC (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,028 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	899	687	729	676	701
150	879	850	801	748	721
200	823	875	804	888	842
250	988	857	757	865	844
300	1.039	879	864	930	828

Posição (mm)	TC (µs) - S2-100-20-C (200 kHz - 0,11 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	579	432	408	501	500
150	926	654	504	598	640
200	796	695	732	813	641
250	921	1.079	909	768	831
300	1.052	1.155	982	973	830

Posição (mm)	TC (µs) - S2-500-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	699	605	498	603	644
150	796	705	605	720	687
200	672	631	546	706	650
250	837	773	654	756	721
300	878	751	694	871	1.255

Posição (mm)	TC (µs) - S2-75-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	902	739	640	797	748
150	921	931	730	788	700
200	975	921	788	856	637
250	1.026	846	787	808	692
300	945	915	781	830	873

Posição (mm)	TC (µs) - S2-100-20-C (54 kHz - 0,047 N/mm ²)				
	0%	33%	66%	100%	Concreto
100	723	656	738	676	778
150	879	835	765	762	788
200	823	834	715	931	97
250	988	900	711	837	745
300	1.192	1.002	935	904	891

ANEXO A – Boletins Técnicos

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)

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:

Concrescive 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 pode 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.

Sikadur® 43

Adesivo epóxi de baixa viscosidade para reparos e injeção em trincas e fissuras estruturais no concreto

Descrição do produto

Sikadur® 43 é um adesivo estrutural de base epóxi, de baixa viscosidade, isento de solventes, bi-componente, para injeção em trincas e fissuras estáticas em estruturas de concreto, ao qual se pode adicionar areia de quartzo de granulometria pré-determinada (Sikadur® 506) e finos (cimento Portland, cimento Pozzolânico, Caolim, etc.), formando uma argamassa sintética para reparos em pisos e estruturas de concreto.

Campos de aplicação

- Tratamento de fissuras e trincas estáticas (0,2 a 5,0 mm) em elementos estruturais de concreto.
- Recuperar o monolitismo de estruturas de concreto, com a injeção das fissuras estáticas.
- Reparos localizados em estruturas de concreto com alto tráfego, cargas cíclicas e pontuais.
- Revestimentos de pisos, escadas, elementos de concreto, granilite, pedras, etc.
- Execução e recomposição de lábios poliméricos em juntas de pisos.
- Nivelamento de consoles em pré-moldados para apoio do neoprene.
- Reparo em estruturas hidráulicas.

Características / Vantagens

- Elevada aderência, sem retração, garantindo o perfeito contato e aderência com as superfícies.
- Baixa viscosidade, o que permite ser aplicado por injeção em fissuras a partir de 0,2 mm.
- Maior poder de penetração pelas fissuras, com menor pressão de injeção.
- Evita penetração dos agentes agressivos pelas fissuras.
- Recupera o monolitismo do elemento estrutural.
- Endurecimento rápido.
- Excelente aderência.
- Elevadas resistências mecânicas.
- Resistência química a diversos tipos de produtos.
- Alta resistência à abrasão.
- Elevada durabilidade.

Normas / Aprovações

Atende a norma ASTM C-881/78 classificado como Tipo I, Grau 1, Classe B+C

Dados do Produto

Forma

Aspecto/ Cor

Líquido transparente amarelado.

Embalagem

Lata com 1kg (A+B)

Armazenamento

Condições de armazenamento/ Validade

12 meses a partir da data de produção, se estocados apropriadamente nas embalagens originais e intactas, em temperaturas entre +5°C e +35°C. Protegido da luz direta do sol e do gelo.



Dados Técnicos

Composição básica	Resina epóxi e poliamidas.		
Densidade (25°C)	1,10 kg/l (A+B)		
Resistência à compressão	Resina: 53 MPa após 10 dias (20°C / 65% u.r.a.) Argamassa (*):		
	24 horas	3 dias	7 dias
	50 MPa	55 MPa	60 MPa
	* Referente ao traço 1 : 7 (Sikadur 43 : Sikadur 506)		
Resistência à tração	25 MPa após 10 dias (20°C / 65% u.r.a.)		
Resistência à flexão	50 MPa após 10 dias (20°C / 65% u.r.a.)		
Resistência de aderência	Concreto: 4 MPa Aço: 10 MPa		
Módulo de elasticidade	10,6 GPa		
Viscosidade	500 mPas.s (20°C)		
Coefficiente de expansão térmica	89 x 10 ⁻⁶ / °C		
Cura inicial	8 horas (A+B+C) (20°C / 50% u.r.a.)		
Cura final	7 dias (A+B+C) (20°C / 50% u.r.a.)		
Vida útil da mistura	Pot Life = 20 minutos (1kg a 20°C / 50% u.r.a.)		
Temperatura da superfície	+5°C a +30°C		
Relação da mistura	A : B = 2 : 1 (em peso)		

Informações do sistema

Detalhes de aplicação

Preparo da Superfície

Reparos:

A superfície deve ser estruturalmente resistente, isenta de nata de cimento, pinturas, manchas de óleo, graxa, etc. Antes da aplicação o substrato deve estar limpo e completamente seco.

Fissuras:

A superfície do concreto ao longo da trinca ou fissura deve estar limpa, seca, isenta de pó, sujeiras, desmoldantes, graxa, óleo, pintura e partículas soltas.

O substrato deve estar seco no momento da aplicação. A limpeza poderá ser feita com raspagem superficial com espátula, escovação elétrica com escova de aço e, por último, limpar com jato de ar comprimido (utilizar compressor com retentor de óleo).

1. Executar furos a seco (sem água) de ambos os lados das fissuras ou trincas, alternadamente, ao longo de toda sua extensão, no diâmetro de 8, 10 ou 12mm com ângulo de 45° em direção às fissuras ou trincas. Fixar os bicos ou niples de injeção com Sikadur® 31 diretamente sobre o concreto.

2. O espaçamento entre bicos de injeção é variável de acordo com o tipo de bico, espessura da peça de concreto, abertura da fissura, etc. De forma geral, pode-se adotar a seguinte regra:

- Bicos metálicos de embutir: distância entre bicos = espessura da peça / 2
- Bicos plásticos de superfície: distância entre bicos = espessura da peça

Em peças de grande espessura recomenda-se:

- Fissuras com abertura de até 1mm: distância entre bicos = 5 cm
- Fissuras com abertura entre 1mm e 5mm: distância entre bicos = 25 cm

3. Entre os bicos ou niples, deve-se colmatar a fissura em toda sua extensão com Sikadur[®] 31. Fazer a verificação da intercomunicação entre os bicos ou niples, injetando ar comprimido pelo primeiro bico mantendo os demais fechados com exceção do bico subsequente ao primeiro. Esse procedimento é importante para avaliação da passagem da resina nos serviços de injeção.

4. O Sikadur[®] 43 também pode ser aplicado por derramamento sobre as fissuras de elementos horizontais (lajes e pisos de concreto). Recomenda-se abrir previamente as fissuras com disco de corte (serra elétrica), com espessura mínima de 3 mm e profundidade de 25 mm, tendo-se o cuidado para não cortar barras de aço da armadura.

Preparo do Produto

Recomenda-se iniciar a mistura após o preparo das superfícies a serem tratadas. Sikadur[®] 43 já vem pré-dosado, devendo inicialmente ser feita a homogeneização dos componentes A e B em separado. Fazer, em seguida, a mistura de ambos, misturando-os na sua totalidade. A mistura pode ser feita com hélice mecânica de baixa rotação (400-500 rpm) com hélice acoplada (1 minuto) ou manualmente (3 minutos), tendo cuidado para não elevar excessivamente a temperatura da mistura. O material misturado deve apresentar-se homogêneo.

Argamassa epóxi para reparos:

Após os componentes estarem convenientemente misturados, adicionar a quantidade recomendada de areia de quartzo Sikadur[®] 506 (componente C) e finos (cimento) para confeccionar a argamassa, em função do trabalho a ser executado.

Aplicação do Produto

Reparos:

Inicialmente, deverá ser aplicada no substrato uma pintura de Sikadur[®] 43 (A+B) como primer antes da colocação da argamassa com Sikadur[®] 43. A aplicação da argamassa deverá ser feita sobre o primer ainda úmido, preferencialmente, com desempenadeira metálica, podendo ser utilizada colher de pedreiro. A proporção em peso da mistura A+B e do componente C pode variar de 1:2 até 1:10 (A+B) dependendo do serviço que será realizado.

Injeção:

O Sikadur[®] 43 somente poderá ser aplicado após no mínimo 8 horas da colmatação da fissura e fixação dos bicos e niples com Sikadur[®] 31.

Após a homogeneização dos componentes A e B, verter o Sikadur[®] 43 em equipamento apropriado para injeção de fissuras. Realizar a injeção sempre de baixo para cima ou de um lado para o outro. Quando o Sikadur[®] 43 aflorar no bico adjacente, vedar o anterior e continuar a injetar a partir desse, e assim sucessivamente. A pressão de injeção deve ser adequada à espessura a ser injetada.

Após 24 horas retirar os bicos e o material de colmatação e dar acabamento superficial. Em temperatura ambiente acima de +30°C, o material deve ser armazenado em local refrigerado por 12 horas antes do uso. Para a injeção, recomendamos bombas de injeção elétricas tipo Sika Injection Pump EL-1 ou EL-2, Graco Ultra 395/495/595 ou manuais tipo Sika Injection Pump Hand-1 ou Hand-2.

Observações:

1. O espaçamento entre furos é função da maior ou menor abertura da fissura.
2. Para perfeita colmatação da fissura, é importante efetuar uma boa limpeza e secagem, bem como assegurar a intercomunicação entre os diversos furos de injeção.
3. A pressão de injeção deve variar de acordo com as características da peça a ser tratada, como espessura, abertura da fissura, etc. De forma geral, pode-se adotar a seguinte regra para determinação da pressão máxima de injeção:

$$P_{m\acute{a}x. (bar)} = (resist\acute{e}ncia\ do\ concreto\ em\ MPa \times 10) / 3$$

4. Sikadur[®] 43 é indicado para fissuras e trincas estruturalmente estáticas.

Limpeza das ferramentas

Limpe todas as ferramentas e equipamentos de aplicação com solvente apropriado imediatamente depois de usá-las. O material endurecido/curado só pode ser removido mecanicamente.



Consumo

1. Injeção de trincas e fissuras 1,1 kg/l.
2. Primer de aderência Sikadur® 43 (A+B): 200g/m² aproximadamente, dependendo da porosidade da superfície.
3. Argamassa epóxi de alta resistência Sikadur® 43 (A+B) + Sikadur® 506. Quantidades aproximadas para aplicação em 1m², com espessura de 5 mm:

Dosagem	Sikadur® 43 (A+B) (kg)	Sikadur® 506 (kg)
1:5	1,60	8,00
1:6	1,40	8,40
1:7 *	1,25 *	8,75 *
1:8	1,10	8,80
1:9	1,00	9,00

* Traço mais utilizado

Nota: Os consumos apresentados são teóricos e podem variar dependendo das condições do substrato e não consideram possíveis perdas durante a mistura e aplicação.

Base dos Valores

Todos os dados técnicos aqui contidos são baseados em testes de laboratórios. Medidas de valores em condições reais podem variar devido a condições fora de nosso controle.

Informações de Segurança e Ecologia

Para mais informações sobre manuseio, estocagem e disposição dos resíduos consulte a versão mais recente de nossa Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ) que contém os dados disponíveis, das propriedades físicas, de ecologia, de toxicidade, e outros dados de segurança pertinentes.

Nota Legal

As informações e em particular as recomendações relacionadas com a aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas de boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais. Na prática, as diferenças no estado do material, das superfícies, e das condições de aplicação no campo, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um determinado fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de quaisquer recomendações por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os usuários deverão sempre consultar as versões mais recentes das fichas de produto dos respectivos produtos, que serão entregues sempre que solicitadas.



GBC BRASIL

Sika Brasil
Av Dr Alberto Jackson Byington, 1525
Vila Menck – Osasco – SP
CEP: 06276-000
Brasil

Tel. + 55 11 3687 4600
Fax : +55 11 3601 0288
e-mail : consumidor.atendimento@br.sika.com
www.sika.com.br



MasterInject® 190

Antigo Concrevis 90

Adesivo epóxi de baixa viscosidade para reparo e injeção de trincas e microfissuras no concreto

Descrição do Produto

Adesivo epóxi bicomponente, de baixa viscosidade e grande capacidade de penetração capilar. É recomendado para injeção de trincas e fissuras estáticas em estruturas de concreto

Campos de Aplicação

MasterInject® 190 foi especialmente desenvolvido para utilização em fissuras e trincas estáticas (0,2 a 1,0 mm), em elementos estruturais de concreto com a finalidade de recuperar o monolitismo do elemento estrutural.

Propriedades e Benefícios

- Baixa viscosidade, permite aplicações por injeção em fissuras a partir de 0,2 mm;
- Permite aplicação por gravidade, sem a necessidade de executar furos e fixar bicos de injeção;
- Alto poder de penetração e alta aderência;
- Possui elevadas resistências mecânicas;
- Após endurecimento, não apresenta retração;
- Resistente a intempéries;
- Possui resistência química

Embalagem

Kits de 1 kg

Parte A: 0,83 kg

Parte B: 0,17 kg

Dados do Produto

Base Química

Resina epóxi

Versão No.003

Data: 11.11.2016

Dados Técnicos

PARAMETRO	VALOR
Aspecto	Líquido
Densidade , g/cm ³ TM 578B*	1,040 a 1,090
Retração	< 3%
Viscosidade - 10 °C , cps TM 117B*	275 - 325
Viscosidade - 23 °C , cps TM 117B*	100 - 150
Pot life , minutos	15 - 30
Gel time , minutos TM 616B*	30 - 60
Secagem ao toque , minutos TMB 013*	4 a 6
Resist. a Compressão , Mpa TM 234B*	Aprox. 80
Dureza Shore D , 2 dias TMB 034*	63 - 77
Espessura de aplicação , mm	Até 10
Temperatura de aplicação , °C	10 - 30

* Método interno BASF

Consumo

Consumo estimado: 1,065 kg/m²/mm

Aplicação do Produto

Preparo da superfície

A superfície deverá estar seca, livre de pó, partículas soltas, óleo, graxa e qualquer outro contaminante. 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 jato abrasivo.

Para aplicação por bomba de injeção

Executar furos à seco de ambos os lados das fissuras ou trincas, alternadamente, ao longo de toda a sua extensão, no diâmetro de 8, 10 ou 12 mm com ângulo de 45 graus em direção às fissuras ou trincas. Fixar os bicos ou niples de injeção com **MasterEmaco® ADH 227** diretamente sobre o concreto.

O espaçamento entre os bicos de injeção é variável de acordo com o tipo de bico, espessura da peça de concreto, abertura da fissura, etc. De forma geral, pode ser adotada a recomendação a seguir:

Em fissuras com abertura de até 1mm o espaçamento entre os bicos ou niples deve ser de 5cm.

Entre os bicos ou niples, deve-se colmatar a fissura em toda a sua extensão com **MasterEmaco ADH® 227**. Fazer a verificação da intercomunicação entre os bicos ou niples, injetando-se ar comprimido em um dos bicos e os outros estando fechados, exceto o bico ao lado da injeção de ar. Esse procedimento é importante para a avaliação da passagem da resina nos serviços de injeção.

Preparo do produto:

A BASF recomenda preparar o produto somente após a finalização do preparo da superfície. O **MasterInject® 190** já vem na proporção correta de mistura.

- Homogeneíze cada um dos componentes em separado até obter um aspecto homogêneo;
- Em seguida, adicione o componente B no componente A e misture até a perfeita homogeneização, preferencialmente usando um misturador mecânico de baixa rotação (400 a 500 rpm).

O **MasterInject® 190** somente poderá ser aplicado após no mínimo 8 horas da colmatação da fissura e fixação dos niples e bicos com o **MasterEmaco ADH® 227**.

Aplicação

O **MasterInject® 190** foi desenvolvido para aplicação por gravidade bastando apenas verter a embalagem nas fissuras a serem reparadas.

Para a aplicação por bombas de injeção:

Verter a mistura no equipamento apropriado para injeção de fissuras. Realizar a injeção sempre de baixo para cima em fissuras verticais, ou de um lado para outro em fissuras horizontais. Quando **MasterInject® 190** aflorar no bico adjacente, vedar o anterior e continuar a injetar a partir desse, e assim sucessivamente.

A pressão de injeção deve ser adequada à espessura a ser injetada.

Após 24horas, retirar os bicos e o material de colmatação e dar acabamento superficial.

Limpeza das Ferramentas

As ferramentas e materiais utilizados devem ser limpos com solvente para epóxi imediatamente após o uso. Após a cura o produto somente será removido mecanicamente

Armazenagem

MasterInject® 190 deve ser armazenado em local coberto, seco e fresco, em temperaturas entre 10°C e 40° C nas embalagens originais lacradas. Temperaturas mais baixas poderão ocasionar a cristalização do material. Se ocorrer cristalização, aquecer o produto à temperatura ambiente (21° a 23° C), e reconstituir por agitação leve. Não usar ar pressurizado para agitação.

Validade

Se for armazenado em recipientes originais nas condições indicadas, a validade é de 12 meses

Observações / Limitações

- O espaçamento entre os furos é função da maior ou menor abertura da fissura;



We create chemistry

- Para perfeita colmatação da fissura, é importante efetuar uma boa limpeza e secagem, bem como assegurar a intercomunicação entre os diversos furos de injeção;
- A pressão de injeção deve variar de 0,42 a 0,84 Mpa (60 a 120 psi), de acordo com as características da peça a ser tratada: espessura, abertura da fissura, etc.
- A temperatura dos dois componentes deve estar entre 10° a 25° C para manter o tempo de trabalhabilidade “pot life”.

Segurança

Consulte a Ficha de segurança (FISPQ) do **MasterInject 190**.

Em qualquer caso, é recomendável aplicar as precauções normais para manuseio de produtos químicos (Por exemplo, usar luvas e óculos de segurança).

Os dados mencionados nesta ficha técnica são baseados em provas de laboratório cuidadosamente controlados. Possíveis variações podem ocorrer dentro de limites que consideramos razoáveis, mas recomendamos que o cliente realize testes previamente nas suas condições específica para possíveis ajustes, se necessário. Em caso de dúvidas, recomendamos consultar nosso Departamento Técnico

BASF SA

Avenida das Nações Unidas,
14.171, Morumbi

04794-000 Sao Paulo – SP, Brasil Tel:
+55 11 2718 5507

www.basf-cc.com.br

BASF Química Colombia S.A.

Calle 99 # 69C – 32
Bogotá, D.C. Colombia

Tel: +57 1 632 20 90

www.basf-cc.com.co

BASF Construction Chemicals Ltda.

Rio Palena 9665
Núcleo Empresarial ENEA

Santiago de Chile,
Chile Tel: +56-2
2799 4300

www.basf-cc.cl

BASF Venezolana S.A.

Edif. Torreón, Piso 4, Of. 4B
Av. Veracruz con calle la Guairita,

Tel : + 58 212 9586711

www.basf-cc.com.ve

BASF Construction Chemicals Perú S.A.

Jr. Plácido Jiménez N° 630

Lima 1,Peru
Tel: +51-1 219 0630

www.basf-cc.com.pe

BASF Ecuatoriana S.A.

Av. Naciones Unidas 1014
y Av. Amazonas Edif. La Previsora

Tel : + 593 2397 9500

www.basf-cc.com.ec

ANEXO B – Laudo Técnico do Cimento

Laudo técnico do cimento CP IV-RS.

DATA	Resistências à compressão (MPa)			Cons. Normal	Tempo de pega (min)		Exp. Quente	#325	Blaine	503
	3 Dias	7 Dias	28 Dias	%	Início	Fim	mm	%	cm ² /g	%
02/02/2017	17,3	24,0	--	35,0	160	250	2,00	3,62	5.977	40,19
03/02/2017	22,1	27,5	--	31,4	190	265	1,00	4,16	5.091	36,06
07/02/2017	17,6	25,8	--	35,2	180	255	--	4,26	6.130	40,42
08/02/2017	19,1	26,2	--	35,0	180	255	2,00	4,36	6.156	38,18
09/02/2017	20,6	26,2	--	32,4	185	260	2,00	4,55	5.127	36,25
10/02/2017	19,4	24,9	--	32,0	220	295	1,00	3,66	5.300	38,42
14/02/2017	18,7	24,3	--	33,6	310	385	--	4,26	5.563	39,94
15/02/2017	16,3	24,3	--	33,6	170	245	1,50	3,86	5.968	39,94
18/02/2017	16,5	24,0	--	34,4	200	275	3,00	4,41	5.723	40,52
19/02/2017	27,2	32,8	--	30,6	180	255	--	4,52	3.852	28,89
20/02/2017	16,5	24,1	--	34,2	250	390	1,00	4,63	5.654	40,05
21/02/2017	16,4	24,2	--	34,0	295	385	1,00	4,86	5.497	39,37
22/02/2017	17,7	--	--	33,0	300	405	1,00	4,29	5.342	38,26
23/02/2017	25,5	--	--	30,0	245	320	1,00	4,00	3.643	29,01
24/02/2017	17,0	--	--	34,8	200	275	2,00	3,62	5.606	39,64
27/02/2017	15,7	--	--	34,4	190	265	--	5,09	5.477	39,45
Média	19,0	25,7	--	33,4	216	299	1,54	4,26	5.382	37,79
Mínimo	15,7	24,0	--	30,0	160	245	1,00	3,62	3.643	28,89
Máximo	27,2	32,8	--	35,2	310	405	3,00	5,09	6.156	40,52
SD	3,3	2,4	--	1,6	48	56	0,63	0,42	693	3,58
NBR 5736	10	20	32	-	> 60	< 720	5,00	-	-	4,00

Fonte: Supremo Cimentos.