

Mateus de Assunção Hofmann

**ATENUAÇÃO DA ENERGIA DO SINAL ULTRASSÔNICO NA
DETECÇÃO DE DANOS POR FISSURAÇÃO NO CONCRETO**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Ivo José Padaratz, PhD.

Florianópolis
2015

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

Hofmann, Mateus de Assunção

ATENUAÇÃO DA ENERGIA DO SINAL ULTRASSÔNICO NA DETECÇÃO
DE DANOS POR FISSURAÇÃO NO CONCRETO / Mateus de Assunção
Hofmann ; orientador, Ivo José Padaratz - Florianópolis,
SC, 2015.

140 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Ultrassom. 3. energia do sinal
ultrassônico. 4. detecção de fissuras. I. Padaratz, Ivo
José. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Mateus de Assunção Hofmann

ATENUAÇÃO DA ENERGIA DO SINAL ULTRASSÔNICO NA DETECÇÃO DE DANOS POR FISSURAÇÃO NO CONCRETO

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 21 de outubro de 2015.

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

Prof. Ivo José Padaratz, PhD.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Ângela do Valle, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, PhD.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Este trabalho é dedicado à divulgação
e ao aperfeiçoamento da ciência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus. Aos meus pais José Ricardo Hoffmann e Raquel de Assunção Hofmann por todos os ensinamentos, empenho e dedicação em me dar oportunidade de estudar, herança mais valiosa. Muito obrigado! Aos meus avós que tive o prazer de conhecer, em especial, meu avô Muneral Anastácio de Assunção (in memoriam), meu grande amigo. Vovô espero que esteja orgulhoso desta conquista e obrigado por sempre estar ao meu lado.

Ao Professor Ivo José Padaratz, meu orientador, por sua atenção e credibilidade, pelos “puxões de orelha” aconselhadores, pelas divididas no futebol, pela confiança depositada, pelos incentivos e principalmente pelo amigo que considero.

Ao Professor Roberto Caldas A. Pinto, pela troca de conhecimento na área, pelo profissionalismo exemplar com ideias e sugestões compartilhadas e pelo apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

À Professora Ângela do Valle, pelas valiosas contribuições dadas no exame de qualificação. Aos Professores Otávio Silveira e Wellison Gomes pelas dicas em Matlab. À todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC. E também, às queridas meninas Marinea e Priscila da secretaria do PPGEC.

Aos amigos e colegas do futebol de terça e de quinta, em sua maioria do PPGEC e ECV, particularmente ao Professor Higashi que sempre apostou e apreciou o bom futebol apresentado.

Em especial, aos amigos e colegas que tive o prazer de aqui conhecer e conviver, no início: Alverlando, André Carlon, Augusto, Elizabeth, Gustavo Savaris, Idilson, Lourenço, Mariana Martino e Samara. Ao longo do curso: Ana Carolina Viana, Ana Giovanetti, Auro, Fabiano, Lucas Ongeho, Mariana Milanez, Moisés, Paulo, Priscila, Ricardo, Sabrina, Steffi e Vinicius. Aos que chegaram por último, mas não menos importantes: Ananda, Renato e Vanessa Vanin. Por fim, a todos os amigos e colegas, da salinha (GRUPEX) e do PPGEC.

Ao GPEND (Grupo de Pesquisa em Ensaios Não-destrutivos) e LEE (Laboratório de Experimentação de Estruturas) pelo fornecimento dos equipamentos e instrumentos necessários para realização deste trabalho.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro concedido pela bolsa de mestrado.

RESUMO

Esta dissertação visa dar continuidade aos estudos desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa em Ensaio Não Destrutivos (GPEND) da UFSC. O grupo atua na pesquisa de métodos de análise e aplicação de técnicas de ensaios não destrutivos para avaliação de propriedades mecânicas de diversos tipos de materiais e estruturas. Isto porque, durante as últimas décadas um número cada vez maior de construções tem apresentado sinais precoces de deterioração. Com isso, a avaliação de estruturas cada vez mais necessita de parâmetros confiáveis para uma resposta na detecção de danos. Algumas técnicas de ensaios não destrutivos (END) se apresentam relativamente eficientes para a tomada de decisões quando na presença de danos expressivos como microfissuras. Entretanto, muitas dessas técnicas consagradas não têm potencial para uma resposta robusta diante de pequenos defeitos, como microfissuras. Muito recentemente, a análise do formato da onda ultrassônica vem sendo utilizada em estudos na detecção de fissuras. Dentre os principais parâmetros está a energia do sinal de ondas ultrassônicas. Diante disso, neste trabalho é abordado o estudo da energia do sinal ultrassônico com vistas para detecção de micro e microfissuras. Alguns critérios de análise da energia do sinal ultrassônico foram preliminarmente estudados com base em resultados obtidos por trabalhos desenvolvidos anteriormente pelo GPEND. Posteriormente, um programa experimental foi desenvolvido com emprego de ensaios de ultrassom durante ensaio de flexão à quatro pontos em vigas de concreto armado para monitorar o comportamento deste elemento com os acréscimo de carga e possíveis respostas na atenuação da energia do sinal. Os resultados mostraram que o parâmetro da energia se mostrou sensível na detecção de fissuras nas placas de concreto e em vigas de concreto armado. Verificou-se que o ganho do sinal das amplitudes tem influência nos resultados e que a janela de tempo correspondente à energia total do sinal foi similar as adotadas por diversos pesquisadores. Em relação a influência das armaduras, nas duas distâncias testadas em relação aos transdutores não houve influências significativas nos resultados. E por fim, as equações para cálculo da energia do sinal, sugeridas pela literatura, foram analisadas sendo que a equação que eleva as amplitudes ao quadrado possui maior sensibilidade, porém com maior coeficiente de variação dos resultados.

Palavras-chave: Ultrassom; energia do sinal ultrassônico; detecção de fissuras.

ABSTRACT

This dissertation aims to continue the studies conducted by the Research Group on Non-Destructive Testing (GPEND) of UFSC. The group acts in the research methods of analysis and application of non-destructive testing techniques for the evaluation of mechanical properties of various types of materials. This is because during the last decades an increasing number of buildings have shown early signs of deterioration. With that, the assessment of structures increasingly needs reliable parameters for a good response in the detection of damage and cracking. Some non-destructive testing techniques (NDT) are relatively effective to take decisions in the presence of significant damage due to macro cracks. However, many of these techniques have no potential for a robust response in the presence of small defects such as micro cracks. More recently, analysis of ultrasonic wave format have been used to detect cracks. Among the main parameters involved, stands out the energy of ultrasonic signal. In this work, the approach was to study the energy of ultrasonic waves in detecting microcracks. Therefore, this work is approached to study the energy of the ultrasonic signal with a view to detect micro and macrofissuras. Some criteria for analysis of the energy of ultrasonic signal were preliminarily studied based on results of previous work by GPEND. Later, an experimental program was developed with the use of ultrasound tests during bending test at four points in reinforced concrete beams to monitor the behavior of this element with the load increase and possible responses in the signal energy attenuation. The results showed that the energy parameter was sensitive in the detection of cracks in concrete plates and the beams of reinforced concrete. It was found that the gain of the amplitude of the signal has influence on the results and the corresponding time frame to the total energy of the signal is similar to those adopted by many researchers. In relation the influence of reinforcement, in both distances tested with respect to the transducers there was no significant influence on the results. Finally, the equations for calculating the signal energy, suggested by the literature, were analyzed and the equation that increases the squared amplitude is more sensitive, but with a higher coefficient of variation of the results.

Keywords: Ultrasound; energy of the ultrasonic signal; detecting cracks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Propagação de uma onda longitudinal.....	34
Figura 2.2: Propagação de uma onda longitudinal.....	36
Figura 2.3: Atenuação de ondas por feixes de dispersão e absorção.	38
Figura 2.4: Atenuação de ondas por feixes de dispersão e absorção.	42
Figura 2.5: Atenuação de ondas por feixes de dispersão e absorção.	42
Figura 2.6: Campo sonoro de um feixe de ondas.....	43
Figura 2.7: Campo sonoro de um feixe de ondas.....	44
Figura 2.8: Modos de transmissão: (a) direto; (b) semidireto e (c) indireto.....	46
Figura 2.9: Modos de transmissão: (a) direto; (b) semidireto e (c) indireto.....	46
Figura 2.10: Acoplamento de transdutor.....	47
Figura 2.11: Formato de ondas em argamassas com teores de danos distintos.	50
Figura 2.12: Curvas velocidade e energia versus teor de inclusões de danos.	52
Figura 2.13: Energia acumulada para diferentes teores de danos.	53
Figura 2.14: Instalação experimental para medição com ultrassom.....	54
Figura 2.15: Energia acumulada para diferentes teores de danos.	55
Figura 2.16: Configuração da disposição dos transdutores e do entalhe.....	57
Figura 2.17: Curvas de carga versus tempo versus energia do sinal das vigas.	57
Figura 2.18: Disposição da armadura e dimensões das lajes.	58
Figura 2.19: Configuração e instrumentação do ensaio das lajes.....	59
Figura 2.20: Propagação de fissuras e deformações específicas das lajes.....	60
Figura 2.21: Curvas de atenuação da energia em relação as faces da laje NS.	61
Figura 2.22: Distorção sinais nas faces de tração e compressão da laje NS.....	63
Figura 3.1: Fôrma das placas de concreto.....	66
Figura 3.2: Esquemática do túnel para secagem da placa a ser fissurada.	67
Figura 3.3: Placa de concreto fissurada por retração plástica.	68
Figura 3.4: Ensaio de ultrassom com PUNDIT Lab® em uso.	68
Figura 3.5: Pontos de leitura de ultrassom nas placas de concreto.	69
Figura 3.6: Formato da onda ultrassônica no ponto 17.....	71
Figura 3.7: Formato da onda ultrassônica no ponto 23.....	71
Figura 3.8: Resultados da energia (0 a 500 μ s) - Equação 2.13b - (1 a 20).	72
Figura 3.9: Resultados da energia (0 a 500 μ s) - Equação 2.13b - (1 a 20).	72
Figura 3.10: Resultados da energia (0 a 1600 μ s) - Equação 2.13b - (1 a 20).	73
Figura 3.11: Resultados da energia (0 a 1600 μ s) - Equação 2.13b - (21 a 32).	73
Figura 3.12: Resultados da energia (0 a 500 μ s) - Equação 2.13a - (1 a 20).....	74
Figura 3.13: Resultados da energia (0 a 500 μ s) - Equação 2.13a - (21 a 32).....	74
Figura 3.14: Resultados da energia (0 a 1600 μ s) - Equação 2.13a - (1 a 20).....	75
Figura 3.15: Resultados da energia (0 a 1600 μ s) - Equação 2.13a - (21 a 32).....	75
Figura 3.16: Energia acumulada do ponto 17, Equação 2.13a.	77
Figura 3.17: Energia acumulada do ponto 23, Equação 2.13a.	77
Figura 3.18: Energia acumulada do ponto 17, Equação 2.13b.....	78
Figura 3.19: Energia acumulada do ponto 23, Equação 2.13b.....	78
Figura 4.1: Fôrmas das vigas de concreto armado.....	85
Figura 4.2: Moldagem, adensamento e nivelamento das vigas.....	86

Figura 4.3: Controle dimensional da seção das vigas.	86
Figura 4.4: Ensaio de abatimento Slump Test.	87
Figura 4.5: Moldagem dos corpos de prova.	87
Figura 4.6: Detalhamento das armaduras para as vigas VA e VB.	88
Figura 4.7: Disposição dos transdutores ultrassônicos nas vigas.	89
Figura 4.8: Calibração do Pundit Lab.	89
Figura 5.1: Diagrama carga x deslocamento das vigas.	94
Figura 5.2: Sinal ultrassônico V25A.	95
Figura 5.3: Sinal ultrassônico V50B.	96
Figura 5.4: Energia acumulada - Equação 2.13b - ganho 10x.	97
Figura 5.5: Energia acumulada - Equação 2.13b - ganho 50x.	100
Figura 5.6: Energia acumulada - Equação 2.13a - ganho 10x.	102
Figura 5.7: Energia acumulada - Equação 2.13a - ganho 50x.	105
Figura 5.8: Comparativo das janelas de tempo para Equação 2.13b.	107
Figura 5.9: Comparativo das janelas de tempo para Equação 2.13a.	108
Figura 5.10: Curvas de energia total calculadas pela Equação 2.13b.	114
Figura 5.11: Curvas de energia total calculadas pela Equação 2.13a.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades intervenientes no coeficiente de atenuação.	40
Tabela 2.2: Dimensões e profundidades do entalhe das amostras testadas.	56
Tabela 2.3: Propriedades mecânicas do concreto aos 28 e 800 dias.	59
Tabela 3.1: Resultados médios de energia do sinal nos pontos 1 a 20.	76
Tabela 3.2: Resultados médios de energia do sinal nos pontos 21 a 32.	76
Tabela 3.3: Janela Temporal em pontos paralelos as fissuras - Eq. 2.13b.	79
Tabela 3.4: Janela Temporal em pontos que cortam fissuras - Eq. 2.13b.	79
Tabela 3.5: Janela Temporal em pontos paralelos as fissuras - Eq. 2.13a.	79
Tabela 3.6: Janela Temporal em pontos que cortam fissuras - Eq. 2.13a.	79
Tabela 3.7: Análise de variância do sinal calculado pela Equação 2.13b.	80
Tabela 3.8: Análise de variância do sinal calculado pela Equação 2.13a.	80
Tabela 3.9: Comparativo de atenuação de energia entre os modelos.	81
Tabela 4. 1: Geometria e características dos materiais e das vigas.	90
Tabela 5.1: Resultados de momento de fissuração e de ruptura das vigas.	93
Tabela 5.2: Tempos médios correspondentes a 25, 50, 75 e 90% da energia pela Eq. 2.13b e ganho-10x.	97
Tabela 5.3: Análise de variância da influência da armadura nas janelas correspondentes aos percentuais de energia do sinal pela equação 2.13b e ganho de 10x.	99
Tabela 5.4: Ruído médio do sinal (μ s) com ganho de 10X.	99
Tabela 5.5: Tempos médios correspondentes á 25, 50, 75 e 90% da energia pela Eq. 2.13b e ganho-50X.	99
Tabela 5.6: Análise de variância da influência da armadura nas janelas correspondentes aos percentuais de energia do sinal pela equação 2.13b e ganho de 50x.	100
Tabela 5.7: Tempos médios correspondentes á 25, 50, 75 e 90% da energia pela Eq. 2.13a e ganho-10x.	102
Tabela 5.8: Análise de variância da influência da armadura nas janelas correspondentes aos percentuais de energia do sinal pela equação 2.13a e ganho de 10x.	104
Tabela 5.9: Tempos médios correspondentes á 25, 50, 75 e 90% da energia pela Eq. 2.13a e ganho-50x.	104
Tabela 5.10: Análise de variância da influência da armadura nas janelas correspondentes aos percentuais de energia do sinal pela equação 2.13a e ganho de 50x.	105
Tabela 5.11: Resumo das janelas de tempo correspondentes aos percentuais de energia.	110
Tabela 5.12: Energia total para viga 25A com ganho de 10x - Equação 2.13b.	111
Tabela 5.13: Energia total para viga 25B com ganho de 10x - Equação 2.13b.	112
Tabela 5.14: Energia total para viga 25 A com ganho de 50x - Equação 2.13b.	112

Tabela 5.15: Energia total para viga 25 B com ganho de 50x - Equação 2.13b.	112
Tabela 5.16: Energia total para viga 50A com ganho de 10x - Equação 2.13b.	113
Tabela 5.17: Energia total para viga 50B com ganho de 10x - Equação 2.13b.	113
Tabela 5.18: Energia total para viga 50A com ganho de 50x - Equação 2.13b.	114
Tabela 5.19: Energia total para viga 50B com ganho de 50x - Equação 2.13b.	114
Tabela 5.20: Resultados de energia total para viga 25A com ganho de 10x - Equação 2.13a.	115
Tabela 5.21: Resultados de energia total para viga 25B com ganho de 10x - Equação 2.13a.	116
Tabela 5.22: Resultados de energia total para viga 25A com ganho de 50x - Equação 2.13a.	116
Tabela 5.23: Resultados de energia total para viga 25B com ganho de 50x - Equação 2.13a.	116
Tabela 5.24: Resultados de energia total para viga 50A com ganho de 10x - Equação 2.13a.	117
Tabela 5.25: Resultados de energia total para viga 50B com ganho de 10x - Equação 2.13a.	117
Tabela 5.26: Resultados de energia total para viga 50A com ganho de 50x - Equação 2.13a.	117
Tabela 5.27: Resultados de energia total para viga 50B com ganho de 50x - Equação 2.13a.	118
Tabela 5.28: Sensibilidade da velocidade e da energia total para o momento de fissuração - V25A.	119
Tabela 5.29: Sensibilidade da velocidade e da energia total para o momento de fissuração - V25B.	120
Tabela 5.30: Sensibilidade da velocidade e da energia total para o momento de fissuração - V50A.	120
Tabela 5.31: Sensibilidade da velocidade e da energia total para o momento de fissuração - V50B.	120

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	27
1.2 OBJETIVO GERAL	28
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	29
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM SÓLIDOS....	32
2.1.1 Velocidade e tipos de propagação de ondas mecânicas.....	33
2.1.2 Frequência e comprimento de onda.....	37
2.1.3 Atenuação por absorção e dispersão.....	38
2.1.4 Distorção	41
2.1.4 Difração	41
2.2 ENSAIO DE ULTRASSOM.....	44
2.2.1 Modos de operação e dispositivos do equipamento	45
2.2.2 Parâmetro da energia do sinal ultrassônico	48
2.3 ENSAIO DE ULTRASSOM.....	49
2.3.1 Aggelis e Shiotani (2008).....	50
2.3.2 Shiotani e Aggelis (2009).....	53
2.3.3 Santhanam (2010).....	54
2.3.4 Sagar e Prasad (2011)	56
2.3.4 Moradi-Marani, Ricard, Lamarche e Kodjo (2014).....	58
3 ESTUDO PRELIMINAR	65
3.1 ENSAIO DE ULTRASSOM EM PLACAS DE CONCRETO ...	65
3.1.1 Moldagem das placas de concreto.....	65
3.1.2 Processo de fissuração nas placas de concreto.....	67
3.1.3 Ensaio de ultrassom nas placas de concreto.....	68
3.2 DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	70
3.2.1 Dados obtidos e resultados preliminares.....	70
3.2.2 Análise dos resultados.....	80
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	85
4.1 MOLDAGEM DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO	85
4.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS VIGAS	88
4.3 ENSAIO ULTRASSOM E FLEXÃO À QUATRO PONTOS ...	89
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	93

5.1 RESULTADOS DE CARREGAMENTO MECÂNICO	93
5.2 FORMATO DAS ONDAS OBTIDAS PELO ULTRASSOM ...	94
5.3 RESULTADOS JANELAS TEMPO PELA EQUAÇÃO 2.13b.	96
5.4 RESULTADOS JANELAS TEMPO PELA EQUAÇÃO 2.13a.	102
5.5 COMPARATIVO DOS RESULTADOS zJANELAS DE TEMPO ENTRE OS MODELOS DE CÁLCULO	107
5.6 RESULTADOS DE ENERGIA TOTAL DO SINAL	111
5.6.1 Resultados de energia total do sinal pela equação 2.13b	111
5.6.2 Resultados de energia total do sinal pela equação 2.13a	115
5.6.3 Relação de decréscimos velocidade e energia total	119
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
REFERÊNCIAS	125
APÊNDICE A	130
APÊNDICE B	134
APÊNDICE C	138
APÊNDICE D	140

1 INTRODUÇÃO

Fissuras são exemplos de manifestações patológicas que intensificam a deterioração de elementos de concreto, expondo-os às ações contínuas de agentes ou mecanismos agressivos. Este tipo de dano proveniente de fissuras compromete o desempenho das estruturas do ponto de vista da durabilidade. Portanto, um diagnóstico consistente (baseado em monitoramento e inspeções periódicas) é fundamental para possíveis intervenções de manutenção que garantam o desempenho esperado durante a vida útil de uma estrutura em concreto sujeita a presença de fissuras.

A evolução da tecnologia que vem ocorrendo nos últimos anos em todo o mundo tem acelerado o desenvolvimento de novos equipamentos para monitoramento e inspeção do concreto fissurado. No cenário atual, ensaios não destrutivos (END) incorporados em sistemas de monitoramento têm sido constantemente estudados para investigação e detecção de fissuras no concreto (RUCKA e WILDE, 2013).

Dentre as técnicas mais difundidas, destaca-se a propagação de ondas de tensão através da amostra com o uso do aparelho de ultrassom. As respostas podem ser obtidas de maneira tradicional, como medições do tempo de propagação do pulso, ou por meio de parâmetros que envolvem a análise do formato de ondas ultrassônicas (HERTLEIN, 2013).

No primeiro caso, existem limitações na sensibilidade de detecção de fissuras de dimensões reduzidas, como por exemplo as de retração plástica. Isto porque a velocidade de pulso é característica da componente mais rápida da energia, que viaja através do caminho mais curto, não considerando a chegada do restante da energia. Desta forma, o uso de um parâmetro que considere todo o pulso ou a maior parte dele pode ser útil na avaliação do estado de uma estrutura fissurada.

Pesquisas recentes têm demonstrado que as respostas necessárias podem estar no estudo do formato da onda ultrassônica propagada pelo material (AGGELIS e SHIOTANI, 2008; SHIOTANI e AGGELIS, 2009; SANTHANAM, 2010; SAGAR e PRASAD, 2011 e BEHNIA *et al.*, 2014).

O formato da onda é interpretado como uma informação do estado de um elemento físico, bem como seu comportamento quando comparado com elementos similares. Estas informações são descritas por um conjunto de dados chamados de sinal. Uma das vantagens da análise de elementos com base nas informações do sinal é a possibilidade de definir parâmetros quantificáveis do formato da onda.

O formato da onda propagada no concreto pelos transdutores ultrassônicos é adquirido pelo equipamento de ultrassom como um sinal de amplitudes de tensão em função do tempo. Considerando que as trajetórias dos caminhos das ondas acústicas mudam com o grau de fissuração do concreto, o sinal fica suscetível às atenuações das amplitudes, resultando assim, em variações do formato da onda. De acordo com LATHI (2007), conceitualmente existem medidas ou parâmetros que podem representar o comportamento de um sinal.

Parâmetros de análise de ondas são indicadores do tamanho ou de alguma característica do sinal e fornecem uma medida da investigação em questão, podendo ser analisados de modo contínuo ou discreto, seja no domínio do tempo ou da frequência. Assim, a possibilidade de relacionar parâmetros que quantificam o sinal com as propriedades do concreto fez despertar o interesse em diversas pesquisas sobre o assunto.

Recentemente, CARELLI (2014) avaliou a sensibilidade de parâmetros (velocidade de pulso, velocidade de grupo, amplitude máxima, amplitude pico a pico, frequência central, pico de frequência máxima, magnitude de frequência máxima, energia inicial, energia total e energia acumulada) para detecção de fissuras por retração plástica em placas de argamassa e concreto; e também, fissuras por flexão em vigas de concreto armado. Dentre os parâmetros analisados, os três relacionados à energia, e o parâmetro de magnitude de frequência máxima se mostraram os mais sensíveis às mudanças de comportamento diante do processo de fissuração dos elementos.

MORADI-MARANI et al. (2014) focaram na análise do parâmetro de energia, comparando sua sensibilidade em lajes de concreto armado sã e afetadas por reações álcali-silica. Os resultados da energia foram analisados no domínio do tempo e no domínio da frequência (energia espectral). Curvas de atenuação da energia mostraram de forma evidente as mudanças de estádios de deformação das lajes (ponto de formação das primeiras fissuras, escoamento da armadura e ruína), no entanto, houve uma maior redução de energia na eminência da formação das primeiras fissuras no concreto.

Em ambos os trabalhos, os parâmetros relacionados com a energia, mostraram-se sensíveis para detecção de fissuras em elementos de argamassa e de concreto armado. É possível observar que a energia do sinal é um assunto que apresenta potencial de pesquisa por ser promissor e recente no meio, portanto, é importante aprofundar os estudos deste parâmetro para uma validação confiável levando em conta influências externas e outras inerentes à heterogeneidade do material.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Os avanços nos equipamentos de ensaios não destrutivos implicam em maior agilidade e facilidade para obtenção de dados relativos à detecção de fissuras em elementos de concreto. Análises apropriadas dos resultados destes métodos podem ser utilizadas para monitorar o comportamento do concreto durante sua vida útil, ajudando a decidir se a estrutura precisa de reparos ou até mesmo sua substituição completa (SANTHANAM, 2010).

No cenário voltado para pesquisas e inspeção de estruturas danificadas, com a utilização do ultrassom, estão sendo inseridos trabalhos relacionados com a análise de parâmetros, aqui já mencionados, do formato da onda ultrassônica (GARNIER *et al.*, 1995; AKHRAS, 1998; HAUWAERT *et al.*, 1998; HAUWAERT *et al.*, 1999; LANDIS e BAILLON, 2002; AGGELIS e SHIOTANI, 2008; SHIOTANI e AGGELIS, 2009; ROBEYST *et al.*, 2009; SANTHANAM, 2010; SAGAR e PRASAD, 2011; MORADI-MARANI *et al.*, 2014 e CARELLI, 2014).

Dentre os parâmetros observados nestes estudos, a energia do sinal de ondas ultrassônicas, mostra-se mais sensível seja na detecção de danos ou na análise do comportamento mecânico, diante da heterogeneidade inerente ao concreto. Portanto, devido a relevância de estudos com técnicas de monitoramento e diagnóstico de danos em estruturas de concreto, este assunto vem sendo abordado nos últimos anos por pesquisadores de diversos centros de excelência na área de ensaios não destrutivos. Entretanto, determinados aspectos de análise da energia do sinal ultrassônico ainda estão sendo questionados e necessitam de mais investigações.

Esta dissertação visa dar continuidade aos estudos desenvolvidos com a utilização do ultrassom pelo Grupo de Pesquisa em Ensaios Não Destrutivos (GPEND) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), mais especificamente, aprofundar as investigações do trabalho de CARELLI (2014) que, neste grupo, e de uma forma mais abrangente, foi pioneira na pesquisa de diversos parâmetros do formato da onda, concluindo que o parâmetro da energia é sensível na detecção de fissuras. Entretanto, aspectos intervenientes na energia, como: ganho do sinal recebido pelo aparelho; análise de intervalos de tempo limites (janelas de tempo) do sinal; influência da armadura nas leituras; e forma de análise do comportamento da energia do sinal para detecção de fissuras no concreto, não foram estudados.

Conhecer aspectos específicos do parâmetro da energia do sinal ultrassônico é importante para conscientizar os profissionais da área, que existem procedimentos e alguns fatores intervenientes (como a presença da armadura), que devem ser considerados para se obter uma resposta mais confiável e coerente do parâmetro em relação à estrutura estudada.

1.2 OBJETIVO GERAL

Nesta pesquisa, avaliou-se a sensibilidade do parâmetro da energia do sinal ultrassônico na detecção de fissuras (aquelas não detectáveis por outros parâmetros mencionados anteriormente) em elementos de concreto, levando em conta fatores externos e inerentes à heterogeneidade da composição do concreto.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos da pesquisa são apresentados a seguir:

- a) Apresentar modelos de quantificação da energia do sinal ultrassônico apresentados pela literatura e, posteriormente, compará-los em relação à sensibilidade e variação dos resultados na detecção de danos dos elementos em concreto ensaiados;
- b) Analisar a influência do ganho do sinal nos resultados obtidos em vigas de concreto armado, testando ganhos de 10 e 50 vezes, a fim de verificar a ocorrência ou não do truncamento das amplitudes que distorçam os valores de energia de uma amostra sã, quando comparada com uma amostra fissurada;
- c) Verificar intervalos de tempo (janelas de tempo) que representam maior percentual da energia do sinal ultrassônico nos elementos íntegros e com a presença de fissuras;
- d) Avaliar a interferência da armadura de flexão das vigas nos resultados da energia do sinal ultrassônico, variando a distância (cobrimento de concreto) da armadura em relação aos transdutores.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho está organizada em sete capítulos, considerando a introdução e as referências bibliográficas, acrescentando um capítulo de apêndice. Um resumo das considerações abordadas em cada capítulo são destacadas a seguir:

- Capítulo 2: apresenta a **revisão bibliográfica** sobre conceitos de propagação de ondas ultrassônicas, análise de energia de sinais e características do equipamento de ultrassom utilizado nos ensaios experimentais. São apresentados também, de maneira resumida, alguns estudos relacionados à aplicação do parâmetro da energia do sinal de ondas ultrassônicas na detecção de fissuras no concreto.
- Capítulo 3: é realizado um **estudo preliminar** baseado nos formatos das ondas oriundos dos ensaios realizados em placas de concreto por CARELLI (2014). A metodologia de pesquisa e os procedimentos de análise obtidos neste estudo preliminar foram utilizados posteriormente para aplicação na investigação do parâmetro da energia nas amostras de concreto produzidas neste trabalho.
- Capítulo 4: mostra os procedimentos para a **investigação experimental** com a metodologia de análise definida anteriormente. São expostos detalhes da produção das amostras da realização do ensaio de ultrassom efetuado simultaneamente com o ensaio de carregamento estático nas amostras testadas.
- Capítulo 5: está a apresentação dos principais **resultados e comentários** das análises do parâmetro da energia obtidas a partir dos ensaios de ultrassom, relacionando-as com dados de carregamento e evolução da fissuração.
- Capítulo 6: são feitas as **considerações finais** baseadas nesta pesquisa, e também, recomendações de melhorias e outros modos de investigação para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Paralelamente às pesquisas na área médica, técnicas de END com a utilização do ultrassom nas indústrias de materiais e estruturas foram rapidamente desenvolvidas, motivadas justamente, pelos avanços tecnológicos que ocorreram durante a Segunda Guerra Mundial, e posteriormente, com os investimentos em defesa bélica.

Em meados de 1970, reconheceu-se a importância de tornar uma tecnologia de base científica, até então utilizada de maneira qualitativa, para atender às necessidades das indústrias de alta tecnologia como aeroespacial, energia nuclear, defesa, petróleo e gás. Com isso, o ultrassom, em muitas formas, tornou-se uma tecnologia fundamental em diagnósticos avançados e monitoramento *online*, fornecendo dados quantitativos para utilização em prognósticos para estimativa da vida útil de estruturas (ENSMINGER e BOND, 2012).

Como parte desse processo de desenvolvimento, os fenômenos e interações entre o equipamento de ultrassom e diversos materiais existentes foram sendo estudados ao longo dos últimos anos para as mais variadas finalidades.

Em resposta a necessidade de monitoramento de materiais de alto desempenho como metais e compósitos, surgiram métodos ultrassônicos cada vez mais sofisticados baseados em análises da sensibilidade para descrever a capacidade de localizar falhas ou pequenas descontinuidades, sendo a detecção de defeitos uma definição para o reparo ou total substituição do componente.

Tratando-se de estruturas em concreto, técnicas com emprego do ultrassom são realizadas em laboratório desde a década de 1950. No entanto, somente a partir da década de 1970, o desenvolvimento comercial tornou o ultrassom um dos equipamentos amplamente utilizado, principalmente pelo baixo custo atrelado ao ensaio, sendo a velocidade de pulso ultrassônico (VPU) um dos parâmetros mais adotados (KEPLER *et al.*, 2000).

Melhorias no equipamento foram desenvolvidas para determinação de propriedades e avaliação de danos de degradação. Entretanto, é sabido que o desempenho de estruturas de concreto, muitas vezes, é afetado por pequenas falhas como as microfissuras, que facilitam a ação de agentes externos agressivos, dificultando o desenvolvimento de modelos de detecção de danos com a utilização do ultrassom, devido à heterogeneidade do material.

Com isso, o acompanhamento do estado de deterioração de estruturas em concreto tornou-se importante, principalmente nos casos em que são necessárias intervenções de manutenção para que ocorra de maneira segura e econômica (DOUSTI *et al.*, 2013).

Portanto, é essencial o desenvolvimento de novos métodos de análise de parâmetros de ondas ultrassônicas, a fim de melhorar as interpretações de resultados em relação ao concreto.

Os avanços no conhecimento na área de parâmetros de ondas ultrassônicas vêm ocorrendo de forma gradual com a evolução e introdução de novas pesquisas, sendo que recentemente, estudos apontam para métodos voltados à análise da sensibilidade de alguns parâmetros do formato da onda ultrassônica, mostrando ser propício ao monitoramento de danos (SHIOTANI e AGGELIS, 2009).

A quantificação da sensibilidade de parâmetros na investigação de danos no concreto, como o parâmetro da energia de ondas ultrassônicas, deu-se inicialmente na década de 1990 (GARNIER *et al.*, 1995 e HAUWAERT, VAN *et al.*, 1998). Esse novo conceito de investigação estabelece que além dos fatores provenientes do ensaio não destrutivo (END) propriamente dito, são necessárias avaliações não destrutivas (AND) de cada parâmetro em questão, baseadas na análise dos sinais obtidos pelo aparelho de ultrassom.

2.1 ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM SÓLIDOS

A definição física para onda pode ser descrita como uma perturbação que se propaga, de um ponto para o outro através de um meio material ou no vácuo, no decorrer do tempo, transmitindo energia sem transporte de matéria (SEARS *et al.*, 1984).

Conforme sua natureza, uma onda pode ser classificada em eletromagnética ou mecânica. As ondas eletromagnéticas são originárias de cargas elétricas oscilantes e sua propagação não depende do meio em que se encontram, podendo se propagar no vácuo ou em determinados meios materiais.

No entanto, ondas mecânicas requerem (1) uma fonte de perturbação, (2) um meio que possa ser perturbado e (3) algum mecanismo físico através do qual os elementos do meio podem influenciar uns aos outros (SERWAY e JEWETT, 2010).

Ondas sonoras são um exemplo de energia mecânica e sua propagação necessita de partículas para vibrar, não podendo assim, existir no vácuo.

Similarmente, a propagação de ondas ultrassônicas é baseada no conceito de deformações de partículas por vibrações mecânicas variáveis no tempo. Quando partículas de um meio são deslocadas de suas posições de equilíbrio, surgem forças (eletrostáticas) de recuperação interna. São estas forças restauradoras, combinadas com a inércia das partículas, que geram movimentos de oscilação no meio (HELLIER, 2001).

2.1.1 Velocidade e tipos de propagação de ondas mecânicas

A propagação de ondas mecânicas (também chamadas ondas de tensão) é criada quando a superfície de um sólido é perturbada por uma carga dinâmica ou vibratória (BUNGEY *et al.*, 2006).

Embora ondas sonoras possam propagar-se através de todas as formas dos materiais (sólidos, líquidos e gases), o tipo de propagação depende da fase do material. Nos sólidos, ondas de ultrassom podem propagar-se em quatro tipos fundamentais de oscilação das partículas:

- Ondas longitudinais ou de compressão ou “P” (de primária);
- Ondas transversais ou de cisalhamento ou “S” (de secundária);
- Ondas de superfície ou *Rayleigh* ou “R”;
- Ondas de placa ou *Lamb waves*.

O caso geral de propagação de ondas em meio elástico é obtido pela superposição de ondas longitudinais e transversais, que são os dois modos de propagação mais amplamente utilizados em ensaios de ultrassom (BUNGEY *et al.*, 2006).

De acordo com Timoshenko e Goodier (1970), para ambos os tipos de ondas longitudinais e transversais, as equações de movimento têm a seguinte forma comum:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = a^2 \nabla^2 \psi \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde:

$$a = c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (\text{Equação 2.2})$$

para os casos de ondas longitudinais, e:

$$a = c_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{Equação 2.3})$$

para o caso de ondas transversais. Sendo que c_1 e c_2 são velocidades de propagação de ondas planas de compressão e de cisalhamento, respectivamente.

∇^2 representa o operador:

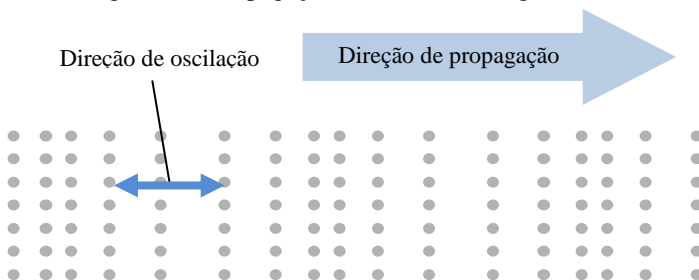
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (\text{Equação 2.4})$$

λ e G são as constantes de Lamé e ρ é a densidade do material.

Em ondas primárias, forças de compressão e dilatação (rarefação) estão ativas durante a propagação. Estas ondas podem ser geradas em líquidos, gases e sólidos, pois a energia se desloca através da estrutura atômica por uma série de movimentos de contração e expansão, propagando-se através de sólidos de forma análoga às ondas sonoras que se propagam através do ar (MIX, 2005).

O movimento das partículas em uma onda longitudinal é paralelo à direção de propagação, ou seja, as oscilações das partículas ocorrem na direção de propagação da onda, Figura 2.1.

Figura 2.1: Propagação de uma onda longitudinal.



Fonte: Serway e Jewett (2010).

No caso de ondas longitudinais, tomando o eixo x na direção de propagação da onda e assumindo que os deslocamentos em y e z são nulos, u ficará uma função somente de x , logo, a equação do movimento nesta direção pode ser descrita por:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_1^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (\text{Equação 2.5})$$

A velocidade c_1 pode ser expressa em termos de E (módulo de elasticidade), ν (coeficiente de Poisson) e ρ por substituição na Equação 2.2 dos valores equivalentes λ e G . Desta forma, obtém-se:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Considerando agora ondas transversais com o eixo x na direção de propagação da onda e o eixo y na direção transversal ao deslocamento, é possível assumir que os deslocamentos u e w são nulos e que o deslocamento v é uma função de x e t . Logo, tem-se que:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = c_2^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (\text{Equação 2.7})$$

Esta equação apresenta a mesma forma da Equação 2.5 e, portanto, a velocidade de propagação c_2 ao longo do eixo x pode ser expressa por substituição à Equação 2.3 em:

$$c_2 = c_1 \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (\text{Equação 2.8})$$

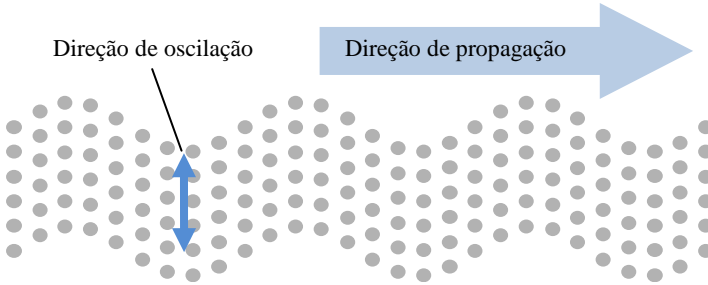
Para $\nu = 0,20$ (valor próximo ao coeficiente de Poisson do concreto), a equação acima fornece:

$$c_2 = \frac{c_1}{\sqrt{3}} \quad (\text{Equação 2.9})$$

No caso de ondas transversais, as partículas oscilam em um ângulo reto ou transversalmente à direção de propagação, Figura 2.2. Este tipo de onda exige um material acusticamente sólido com rigidez de cisalhamento para propagação e, portanto, não se propaga em materiais líquidos ou gasosos.

No concreto, a velocidade das ondas transversais geralmente gira em torno de 60% da velocidade das ondas longitudinais (BUNGEY *et al.*, 2006).

Figura 2.2: Propagação de uma onda longitudinal.



Fonte: Serway e Jewett (2010).

Mesmo quando existem descontinuidades num determinado elemento, c_1 e c_2 são as únicas velocidades de onda possíveis quando a perturbação inicial é confinada a uma região interna finita (TIMOSHENKO e GOODIER, 1970).

No entanto, quando existem contornos livres (ou interfaces entre dois meios), outros tipos de ondas de propagação podem surgir. É o caso das ondas de superfície que se propagam ao longo de uma fina camada superficial com movimento das partículas em formato elíptico (MALHOTRA e CARINO, 2004).

Ondas Rayleigh são similares às ondulações provocadas por uma pedra atirada na superfície d'água em repouso. A uma grande distância da origem, a deformação produzida por estas ondas pode ser considerada como bidimensional.

As expressões da solução geral para ondas de superfície combinam equações de ondas de compressão e de cisalhamento e sua velocidade pode ser obtida pela relação:

$$c_3 = \alpha c_2 \quad (\text{Equação 2.10})$$

onde α é o polinômio,

$$\alpha^6 - 8\alpha^4 + 8\left(3 - \frac{1-2\nu}{1-\nu}\right)\alpha^2 - 16\left[1 - \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\right] = 0$$

Considerando novamente $\nu = 0,20$, é possível chegar que:

$$c_3 = 0,9194c_2 = 0,9194 \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{Equação 2.11})$$

Ou seja, confirmando a hipótese que ondas Rayleigh apresentam uma velocidade ligeiramente inferior em relação às ondas de cisalhamento. Estas ondas de superfície viajam com pouca atenuação na direção de propagação. A profundidade de penetração de uma onda Rayleigh é de cerca de um comprimento de onda e a energia diminui exponencialmente à medida que a onda penetra sob a superfície do material (ENSMINGER e BOND, 2012).

Por fim, quando a energia ultrassônica é introduzida em placas relativamente finas, é propagada por ondas chamadas de ondas de placa. O movimento das partículas é semelhante às órbitas elípticas de ondas de superfície. Ondas de placa têm múltiplas ou diferentes velocidades que dependem da espessura do material e da frequência de propagação.

2.1.2 Frequência e comprimento de onda

Como o concreto é um material de múltiplas fases, a estrutura granular, a concentração relativa de distintas partículas e a presença de descontinuidades e defeitos darão origem a um elevado grau de dispersão acústica (MALHOTRA e CARINO, 2004).

Vazios, fissuras e partículas de agregados presentes no concreto dispersam parte da energia inicial do pulso para direções adversas ao caminho inicial da onda. A magnitude da dispersão é intensamente maior se o comprimento de onda de propagação é menor ou igual ao tamanho do dispersor (MIX, 2005).

Geralmente em ensaios com ultrassom, a frequência selecionada está relacionada com a sensibilidade ou penetração necessária para a investigação. De um modo geral, a propagação de ondas em altas frequências é mais sensível às descontinuidades, no entanto, em baixas frequências proporcionam uma maior profundidade de penetração (ENSMINGER e BOND, 2012).

Algumas características das ondas, como o comprimento de onda, explicam estas questões levantadas e podem ajudar na identificação de defeitos em materiais como o concreto.

Em elementos de concreto, o limite recomendado da frequência é de cerca de 500 kHz, resultando em comprimentos de onda com dimensões comuns aos de agregado graúdo. Nesta faixa de frequência, o comprimento do dispersor pode ser efetivamente percorrido antes que o pulso de onda se disperse completamente. No entanto, frequências menores percorrem maiores comprimentos de trajeto em amostras (BUNGEY *et al.*, 2006).

A relação da velocidade de pulso v e da frequência f pode ser relacionada com o comprimento de onda λ de propagação, de acordo com a equação:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{Equação 2.12})$$

Onde a unidade de medida utilizada para frequência é o Hertz.

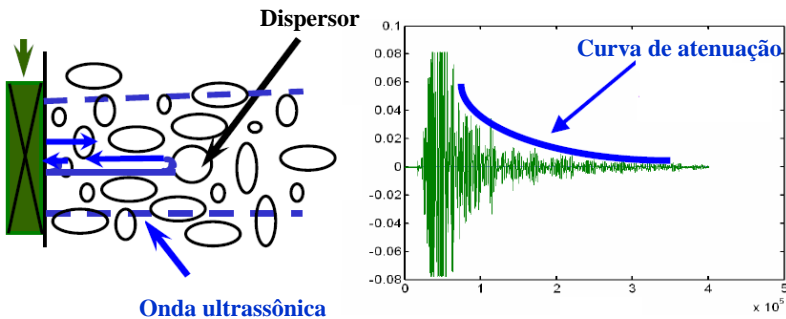
Assim, a onda se moverá a uma determinada distância, proporcional a velocidade característica do material analisado e inversamente proporcional à frequência de transmissão (HELLIER, 2001).

2.1.3 Atenuação por absorção e dispersão

Quando o som viaja através de um meio, sua intensidade diminui com a distância. Em materiais idealizados, a amplitude do sinal é reduzida somente pela propagação, diferentemente dos materiais heterogêneos, que por sua vez, produzem efeitos diversos de atenuação (PHILIPPIDIS e AGGELIS, 2005).

Atenuação ultrassônica pode ser entendida como a taxa de decaimento das amplitudes em função do tempo despendido de propagação através do material, caracterizada por efeitos combinados de dispersão e absorção da energia ultrassônica, Figura 2.3.

Figura 2.3: Atenuação de ondas por efeitos de dispersão e absorção.



Fonte: Garnier et al. (2009).

Dispersão é a reflexão das ondas sonoras em outras direções em relação à direção original da propagação e a absorção é a conversão da energia sonora em outras formas de energia (ANUGONDA *et al.*, 2001).

A absorção pode ser visualizada como uma espécie de efeito de travagem (desaceleração) das oscilações das partículas, assim uma oscilação rápida perde mais energia do que uma oscilação lenta, ou seja, a absorção geralmente é maior com o aumento da frequência, porém a uma taxa menor em relação à dispersão.

Ambos os fatores atenuativos estabelecem influência nos resultados, mas de forma ligeiramente diferente. A absorção reduz a energia transmitida diante de dispersores, seja diante da heterogeneidade intrínseca do material ou na presença de falhas. Para diminuir este efeito, a tensão do transmissor e a amplificação podem ser aumentadas, ou então, o uso de frequências mais baixas pode ser explorado para esta finalidade (KRAUTKRÄMER e KRAUTKRÄMER, 1983).

Aparentemente, a atenuação por dispersão não pode ser combatida através do aumento da tensão do transmissor ou pela amplificação, porque o efeito aumenta simultaneamente. Uma solução é a utilização de frequências mais baixas, que, devido à redução do efeito de irradiação do som e o crescente tamanho dos pulsos estabelece um limite natural para a detecção de pequenas falhas (SHENG, 2000).

A combinação dos efeitos dispersivos e de absorção podem criar perturbações e sinais irregulares dentro de um material. Um dos desafios da ciência que estuda os efeitos relacionados à propagação de ondas ultrassônicas é decifrar e interpretar os sinais de interferência criados pelas propriedades do material (GARNIER *et al.*, 2009).

Uma vez que os mesmos transdutores sejam utilizados e a amplitude de entrada do sinal elétrico seja mantida constante ao longo da série experimental, as alterações na amplitude podem ser atribuídas diretamente pelo comportamento atenuativo do material (GOLIS, 1992).

Quantificar os diferentes mecanismos de atenuação das ondas ultrassônicas em meios heterogêneos propõe teorias e equações com partes complexas. Geralmente, estes mecanismos mais influenciáveis em materiais heterogêneos são: a absorção entre as fases constituintes, reduções viscoinerciais devido às discrepâncias de densidade dos materiais, atenuação térmica e de dissipação por dispersão (AGGELIS e PHILIPPIDIS, 2004).

Absorção e dispersão não podem ser diretamente separadas como mecanismos de atenuação. Estas podem ser determinadas medindo a redução da amplitude de uma onda ultrassônica que tenha percorrido uma distância conhecida através de um meio.

De acordo com Aggelis, Polyzos e Philippidis (2005), estas propriedades das ondas intervêm diretamente na curva de atenuação da energia sonora, influenciando principalmente na frequência de transmissão (*frequency-dependent*), Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Propriedades intervenientes no coeficiente de atenuação.

Escala de interação	Influência da frequência	Mecanismo de atenuação	Intensidade de atenuação	Coeficiente de atenuação
Independente	-	Absorção pura	-	$a_1 \sim k f$
$\lambda \gg s$	f^4	Dispersão Rayleigh	Baixa	$a \sim a_1 + k s^3 f^4$
$\lambda \sim s$	f^2	Dispersão Estocástica	Moderada	$a \sim a_1 + k s f^2$
$\lambda \ll s$	Não há	Dispersão Difusa	Alta	$a \sim a_1 + k/s$

Relações entre o coeficiente de atenuação a , a frequência f , o comprimento de onda λ , a geometria s do dispersor e a constante experimental k .

Fonte: Li-Sheng (1982) e Jacobs e Owino (2000).

Nota-se, que os efeitos de atenuação são influenciados por mecanismos de absorção e dispersão. No caso da absorção, a energia absorvida pelos dispersores aumenta de forma linear com o aumento da frequência de transmissão.

Em relação ao mecanismo de dispersão, pode-se dividir em três regiões distintas. Na primeira região, o dispersor é muito pequeno em relação ao comprimento de onda (regime Rayleigh), produzindo baixa intensidade de atenuação (AGGELIS et al., 2005). Na segunda região (regime estocástico), a dispersão é moderada e o comportamento é regido por modelos matemáticos estocásticos de variáveis aleatórias, definidos num espaço de probabilidade Ω indexado pelo parâmetro de tempo t seja no modo contínuo ou discreto (CASTRO, 2013). Por fim, no regime de difusão, a frequência não influencia na atenuação, pois o comprimento de onda é muito menor que o dispersor, resultando em alta intensidade de dispersão, com comportamento de pulso incoerente (parcela do sinal atenuado em função dos dispersores), sendo explicado pela Teoria da Difusão (LI-SHENG, 1982).

Desta forma, a atenuação por dispersão geralmente é insignificante quando o tamanho do dispersor é menor que o comprimento de onda incidente ($r \ll \lambda$), mas torna-se dominante quando o tamanho das partículas é da mesma ordem de grandeza que o comprimento da onda ultrassônica (McCLEMENTS, 2006).

2.1.4 Distorção

Em um meio homogêneo não dispersivo, a propagação de um pulso numa determinada amostra irá sofrer pouca ou nenhuma distorção, uma vez que a natureza das ondas é não dispersiva. Em contrapartida, num meio heterogêneo, a dispersão distribui a energia em vários percursos com diferentes comprimentos, provocando uma distorção visível em cada formato de onda. Contudo, mesmo com a dispersão, parte da energia sobrevive na direção original de propagação e, portanto, um padrão comum de distorção estará previsto para todos os formatos de ondas individuais (AGGELIS e SHIOTANI, 2008).

Este padrão é conhecido como *padrão de pulso coerente* e pode ser extraído por uma média de vários formatos de ondas individuais. Por outro lado, devido ao caráter aleatório da dispersão, os componentes de dispersão restantes tendem a serem eliminados pela média (PHILIPPIDIS e AGGELIS, 2005).

2.1.4 Difração

Ondas planas que avançam através de meios elásticos homogêneos e isotrópicos tendem a viajar em caminhos de raios retos, ao menos que exista uma mudança nas propriedades do meio. Uma descontinuidade (muito maior do que o feixe incidente) da interface de diferentes propriedades acústicas redireciona a onda plana incidente sob a forma de reflexão ou refração.

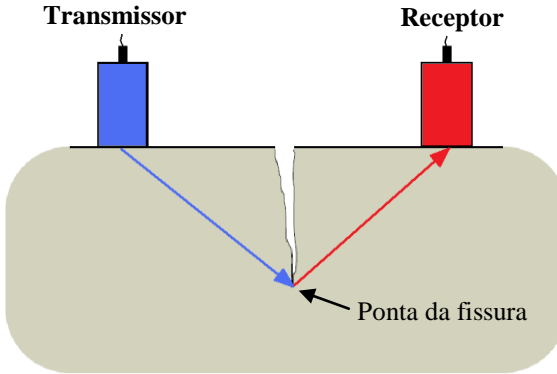
O pressuposto neste caso é que a interface da descontinuidade é grande o suficiente em relação às dimensões do feixe incidente e, portanto, não encontram quaisquer “bordos”. Por outro lado, quando uma onda encontra um ponto dispersor (pequeno em comparação com um comprimento de onda), a onda refletida é novamente irradiada como uma frente de onda esférica (GOLIS, 1992).

Portanto, se um feixe de ondas incidir sobre um obstáculo ou abertura que tenha mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da onda incidente, ocorrerá o fenômeno de difração com ondas contornando os obstáculos e atingindo regiões impossíveis de receber diretamente a onda incidente, Figura 2.4.

No caso de ensaios com ultrassom, é de conhecimento geral que quando pulsos ultrassônicos encontram vazios preenchidos com ar no seu caminho sofrem difração e produzem tempos de propagação maiores.

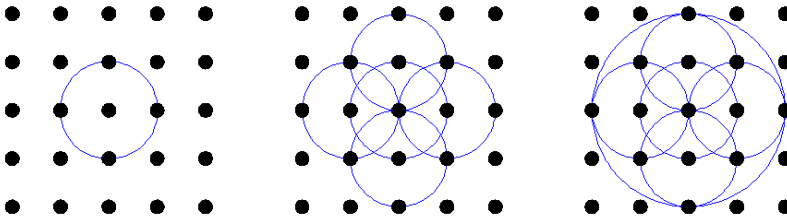
Isto acontece quando a área de projeção do vazio na direção perpendicular à propagação for maior que a área do transmissor (HAUWAERT *et al.*, 1998). Assim, a difração de ondas envolve uma mudança na direção das ondas à medida que passam através de uma abertura ou em torno de uma barreira em seu caminho.

Figura 2.4: Atenuação de ondas por feitos de dispersão e absorção.



De acordo com Christian Huygens (1629-1695), para ondas bi e tridimensionais cada ponto da frente de onda no instante t_0 pode ser considerado como uma fonte de onda secundária produzida no mesmo sentido de propagação com a mesma velocidade da fonte original, sendo que no instante posterior t , a nova frente de onda é a superfície que tangencia as ondas secundárias, ou seja, a envoltória formada pelas novas fontes de ondas produzidas, Figura 2.5.

Figura 2.5: Atenuação de ondas por feitos de dispersão e absorção.

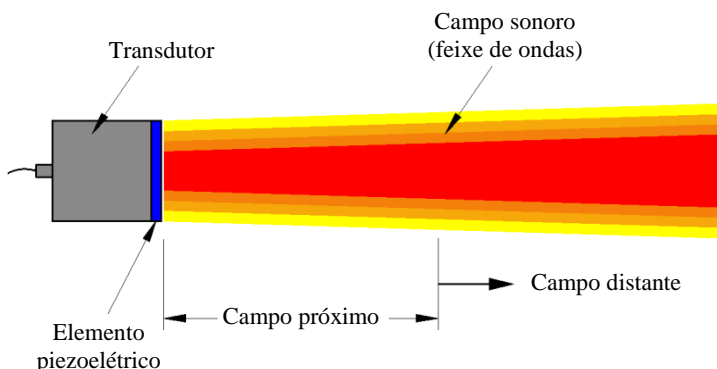


Esse comportamento é, portanto, explicado pelo Princípio de Huygens, o qual partiu da ideia de como funcionavam as ondas concêntricas propondo o método de representação de frentes de onda.

Assim, para compreender melhor o comportamento da propagação de ondas sonoras em sólidos, é necessário expandir o conceito de transporte de energia através de um dado material, pois não se deve tratar ondas sonoras como um único raio, já que o som é propagado no meio como um pulso ou feixe de onda (HELLIER, 2001).

Similarmente, a energia sonora propagada pelo transdutor piezoelétrico não se origina de um único ponto, mas sim de toda superfície do elemento piezoelétrico. O campo sonoro de um transdutor piezoelétrico típico é mostrado na Figura 2.6, onde as cores mais escuras indicam maior intensidade sonora.

Figura 2.6: Campo sonoro de um feixe de ondas.



Fonte: www.ndt.net (Acesso em 17/05/2015).

Dentro do pulso, a intensidade ou a amplitude da energia sonora pode variar. Por conveniência, o pulso é dividido em duas zonas distintas chamadas de campo próximo (*near field*) e campo distante (*far field*). Nestas duas zonas, diferentes mecanismos atuam na variação da intensidade sonora (GOLIS, 1992).

Dado que o ultrassom é originado por um número elevado de pontos ao longo da face do transdutor, a intensidade ultrassônica ao longo do feixe de propagação é afetada por interferências construtivas e destrutivas. Estas interferências de ondas levam a flutuações na intensidade do som próximas à fonte de transmissão, ou seja, no campo “*near field*”.

Devido estas variações dentro de um campo acústico próximo, pode ser extremamente difícil avaliar com precisão falhas em materiais quando estes estão posicionados nesta área.

No fim do campo próximo, as ondas se combinam formando uma frente relativamente uniforme. A área adiante, onde o feixe ultrassônico tem intensidade mais uniforme é chamada de campo “*far field*”.

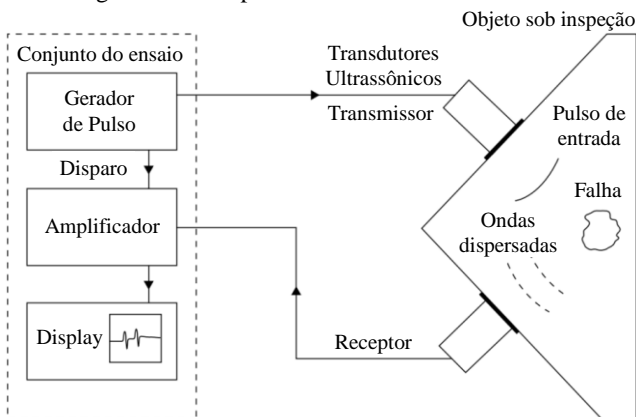
A transição entre o *near field* e o *far field* ocorre a uma distância às vezes conhecida como o “foco natural” de um transdutor plano (ou sem foco). Na área correspondente ao campo distante a onda sonora é bem comportada e a sua incidência é máxima. Portanto, os resultados de detecção ótima de falhas irão ser obtidos quando ocorrem nesta área.

2.2 ENSAIO DE ULTRASSOM

Para uma investigação experimental, a técnica do ultrassom possibilita a escolha de dois modos operantes de atuação: reflexão (eco pulso) e transmissão (transmissor e receptor). Em ambos os modos, as características de propagação podem ser usadas para determinar propriedades de materiais, detectar defeitos e monitorar a taxa de crescimento de fissuras (YAMAN *et al.*, 2001).

Um sistema típico de inspeção com equipamento de ultrassom, no modo transmissão, consiste em produzir um pulso de onda (gerador e transmissor de pulso), transmiti-lo ao concreto, recebê-lo novamente (receptor de pulso) e amplificá-lo, medindo e mostrando o tempo despendido ao longo do trajeto. O equipamento pode também ser conectado a um osciloscópio ou outro dispositivo de visualização do formato da onda, conforme a Figura 2.7 (BUNGEY *et al.*, 2006).

Figura 2.7: Campo sonoro de um feixe de ondas.



Fonte: Ensminger e Bond (2012).

2.2.1 Modos de operação e dispositivos do equipamento

Dependendo da disposição como alguns elementos estruturais em concreto são construídos, muitas vezes é difícil ou até mesmo indisponível uma conexão para a transmissão de ondas. Por isso, de acordo com os modos de operação abordados anteriormente, existem configurações apropriadas que podem propiciar a utilização do ultrassom diante de obstáculos e locais de difícil acesso.

A escolha da disposição de operação dos transdutores está relacionada principalmente com o objetivo e finalidade do ensaio. Destaca-se neste trabalho, o estudo da operação do equipamento no modo de transmissão, que apresenta algumas características distintas em relação ao modo reflexão, relacionadas especificamente à aquisição e processamento de dados, tais como: a menor atenuação da energia do sinal ultrassônico e a inexistência de zona morta (intervalos sem amplitude) no sinal.

No modo transmissão, o campo de ondas ultrassônicas é propagado pela amostra, e geralmente, atenuado pela presença de uma ou mais descontinuidades. Neste modo, existem três possíveis configurações em que os transdutores podem ser dispostos: (1) de transmissão direta; (2) semidireta; e (3) indireta.

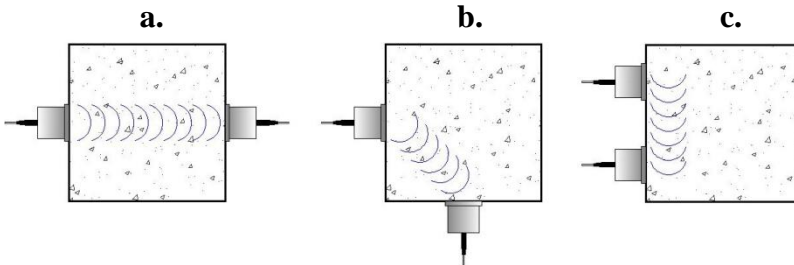
O modo de transmissão direto, Figura 2.8a, consiste no posicionamento dos transdutores alinhados em faces opostas. É considerado o arranjo ideal e mais eficiente, pois a energia máxima do pulso é recebida pelo transdutor receptor. Nesta disposição, um aumento na proximidade entre os transdutores reduz a atenuação da energia (FERRARO, 2003).

O modo de transmissão semidireto, Figura 2.8b, também pode ser utilizado de forma satisfatória. No entanto, é menos eficiente em termos energéticos comparado ao modo direto, devido a geometria da disposição dos transdutores, já que os ângulos envolvidos causam interferência no sinal e, portanto, são mais suscetíveis à erros. O modo semidireto é útil na investigação de elementos com elevada concentração de armadura (YAMAN et al., 2001).

Por fim, no modo indireto de transmissão, Figura 2.8c, a propagação de ondas ocorre entre pontos localizados sobre a mesma superfície do elemento. O pulso se propaga na camada superficial do concreto, no entanto, geralmente esta camada pode apresentar características distintas do concreto encontrado nas partes mais internas do elemento.

Logo, a amplitude do sinal recebido é menor em relação ao modo direto. Apesar do modo indireto ser menos eficiente entre os três modos de disposição, ele é útil em situações onde apenas uma das superfícies da amostra é acessível, como por exemplo, a laje de um pavimento (MALHOTRA e CARINO, 2004).

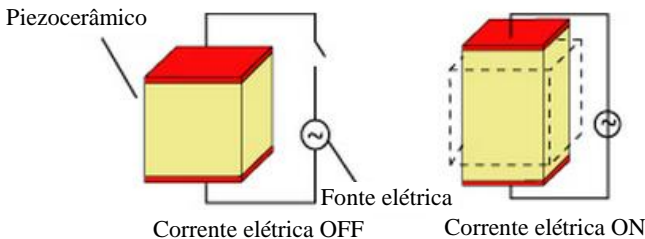
Figura 2.8: Modos de transmissão: (a) direto; (b) semidireto e (c) indireto.



Diante dos modos descritos, é possível observar em termos de ensaio, que os transdutores são um dos dispositivos mais importantes que compõe o sistema do equipamento de ultrassom.

Os transdutores realizam a conversão de ondas por meio de uma placa de material cerâmico ou cristalino polarizado (isto é, constituída de moléculas de cargas positivas e negativas) com elétrodos de alta tensão. Se um campo elétrico é aplicado na placa, as moléculas polarizadas se alinham, resultando em dipolos induzidos dentro da estrutura molecular do cristal. Este alinhamento de moléculas faz os cristais piezoelétricos expandirem e contraírem, Figura 2.9.

Figura 2.9: Modos de transmissão: (a) direto; (b) semidireto e (c) indireto.



Fonte: www.nde-ed.org (Acesso em 15/06/2015).

O formato do material piezoelétrico que compõe os transdutores é responsável pelo tipo de onda emitida (ondas longitudinais, ondas transversais, ondas de superfície e Lamb).

Outra característica inerente aos transdutores é a sensibilidade que, especificamente, refere-se à capacidade do transdutor em detectar pequenas discontinuidades. A frequência do transdutor é escolhida com base na sensibilidade e profundidade de penetração das ondas. Lembrando que quanto maior a frequência, maior a sensibilidade, no entanto, menor a profundidade de penetração (MIX, 2005).

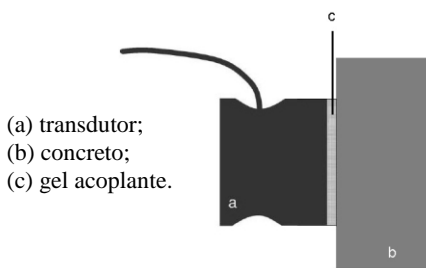
Os materiais considerados heterogêneos tendem a apresentar maiores atenuações com uso de transdutores de contato de alta frequência. Por isso, não é indicada a utilização de transdutores com frequências acima das recomendadas para elementos de concreto, mesmo para amostras sem armadura (SUARIS e FERNANDO, 1987).

As propriedades físicas de transmissão, relacionados com os tipos de ondas, podem ser convertidas em modos de aquisição pelos transdutores, nos domínios do tempo, atenuação, frequência e imagem.

Ensaio não destrutivo em elementos de concreto com a utilização do ultrassom, geralmente utilizam transdutores no domínio do tempo, que medem amplitudes de tensão em função do tempo de pulso de ondas longitudinais, cisalhamento e de superfície. Estes dados formatados no domínio do tempo são correlacionados com propriedades elásticas e mecânicas do elemento em análise.

Entretanto, um dos pontos críticos do ensaio de ultrassom com transdutores de contato, é garantir o contato entre os transdutores e a superfície da amostra, Figura 2.10. Se este cuidado não for tomado, bolsões de ar presentes na interface entre transdutor e a superfície podem acarretar na distorção e atenuação das ondas, mascarando correlações entre o sinal e propriedades da amostra, haja vista que somente uma parcela insignificante do pulso é transmitida pelo ar (NAIK *et al.*, 2004).

Figura 2.10: Acoplamento de transdutor.



Fonte: Ensminger e Bond (2012).

Assim, ambos os transdutores devem ser apropriadamente acoplados na superfície da amostra com um agente de acoplamento (acoplante) para obter resultados confiáveis. Acoplantes são substâncias usadas entre o transdutor e a superfície da amostra para permitir a transmissão de energia ultrassônica.

De acordo com HELLIER (2001), a maioria dos acoplantes permitem a transmissão de cerca de 10 a 15% da energia total. Esse pequeno percentual pode estar relacionado com variações na energia de transmissão por fatores como quantidade de acoplante utilizado, pressão de contato no transdutor e das condições da superfície de contato.

2.2.2 Parâmetro da energia do sinal ultrassônico

Os sinais são representados por funções variáveis no tempo ou no espaço. No caso da aquisição dos dados obtidos pelo ultrassom, os sinais são processados em amplitudes de tensão *versus* tempo. Estas possíveis representações podem ser determinadas por *sistemas* capazes de adquirir, modificar ou extrair informações ao conjunto de dados.

No caso de detecção de fissuras em elementos de concreto com equipamento de ultrassom, as características do concreto não danificado, relacionadas com o sinal (formato da onda característica do material sem danos) estão relacionadas com os dados de *entrada* (frequência do transdutor, tensão de excitação, ganho do sinal, distância entre transdutores) sendo processadas num conjunto de dados de *saída* (amplitudes de tensão em função do tempo).

Sistemas que processam dados de entrada em um conjunto de dados de saída podem ser constituídos com componentes físicos, elétricos ou mecânicos (sistema em *hardware*) ou pode ser um algoritmo que calcula uma saída dado um sinal de entrada (sistema em *software*).

No caso do equipamento do ultrassom, o pulso emitido pelo transdutor transmissor é processado, transmitido e adquirido em sistema *hardware*. Entretanto, posteriormente aos resultados de saída, é possível serem processados com auxílio de algoritmos para análise do sinal.

Como representação de um fenômeno, o sinal que existe em certo intervalo de tempo com amplitude variante, pode ser medido por um número que represente alguma informação a respeito do ensaio.

Tomando como exemplo, a área abaixo de um sinal de amplitudes em função do tempo $A(t)$ como possível medida de informação, irá considerar não somente a amplitude, mas também sua duração.

No entanto, esta medida pode ser defeituosa na medida em que se analisa um sinal grande de $A(t)$, pois suas áreas positivas e negativas podem se cancelar, indicando um sinal de tamanho pequeno.

Esta dificuldade pode ser corrigida pela definição do tamanho do sinal como a área abaixo de $A^2(t)$ a qual é sempre positiva. Podemos chamar esta medida de *energia do sinal* E_A , definida (para um sinal real e contínuo) por:

$$E_A = \int_{-\infty}^{\infty} A^2(t) dt \quad (\text{Equação 2.13a})$$

Também existem outras possíveis representações de medidas do tamanho de um sinal, tal como a energia (área) do sinal retificado:

$$E_A = \int_{-\infty}^{\infty} A^2(t) dt \quad (\text{Equação 2.13b})$$

A energia de um sinal é uma quantidade fundamental em sistemas de transmissão de dados e informações, no entanto, tal como definida pelas Equações 2.13 não indica a energia real (no sentido convencional) do sinal, pois a energia do sinal depende não somente do sinal, mas também de outros fatores extrínsecos que influenciam os dados de entrada.

No caso de ensaios com ultrassom, a força aplicada nos transdutores e a quantidade de material acoplante são intervenientes no formato da onda (sinal ultrassônico).

A energia pode, entretanto, ser interpretada como a energia dissipada em uma carga normalizada de um resistor de 1-ohm, se a tensão $A(t)$ fosse aplicada ao resistor de 1-ohm. Desta forma, a medida de “energia” é indicativa da capacidade de energia do sinal, não da energia real. Por essa razão, os conceitos de conservação de energia não devem ser aplicados a “Energia do sinal” (LATHI, 2007).

2.3 ENSAIO DE ULTRASSOM

A seguir são apresentadas algumas pesquisas relacionadas com a energia do sinal ultrassônico como parâmetro de avaliação da integridade de amostras de concreto e argamassa.

2.3.1 Aggelis e Shiotani (2008)

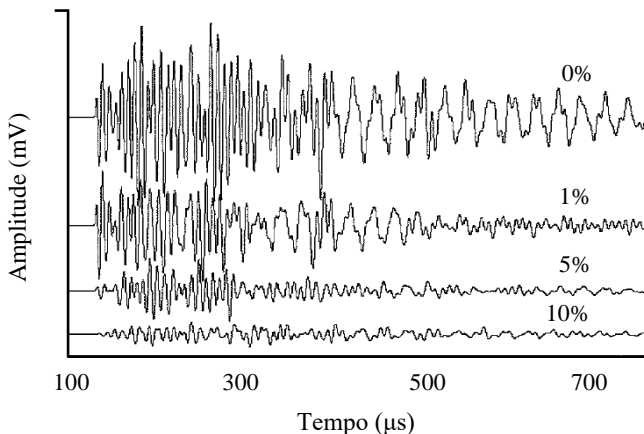
Com exceção da heterogeneidade inerente aos materiais cimentícios, a presença de danos na forma de fissuras pode levar à dispersão da velocidade e a fenômenos de atenuação.

Neste estudo, a relação entre heterogeneidade em materiais cimentícios e parâmetros do formato de ondas ultrassônicas foi investigada em amostras cúbicas de argamassa com 150 mm de lado. A Figura 2.11, apresenta os formatos de ondas obtidos em amostras de argamassa moldadas com partículas (inclusões) em forma de películas de plástico, simulando diferentes teores de volume de danos em relação ao volume total da amostra.

É possível observar a atenuação das amplitudes influenciadas pelo aumento do teor de inclusões (danos). O aumento da heterogeneidade global do material resultou em maior atenuação do sinal ultrassônico.

Geralmente, o comportamento de atenuação do sinal ultrassônico em materiais cimentícios é atribuído à absorção e dispersão. A distinção entre estes dois mecanismos é difícil. Pode-se assumir que as inclusões de plástico diminuíram a absorção da energia, dado as características do material, devido à sua natureza viscosa, no entanto, certamente aumentam a heterogeneidade da mistura.

Figura 2.11: Formato de ondas em argamassas com teores de danos distintos.



Fonte: Aggelis e Shiotani (2008).

No caso específico, as inclusões de plástico atuaram como dispersores da energia das ondas ultrassônicas, redistribuindo a energia para diferentes direções, sendo que o padrão da dispersão da energia depende da forma, tamanho e propriedades mecânicas das inclusões, onde o mecanismo de dispersão torna-se mais dominante na matéria não homogênea, especificamente em concretos danificados devido ao grande número de fissuras que atuam como dispersores distribuídos.

Assim, embora a dispersão de energia das ondas afete diretamente as amplitudes, alguns componentes de energia sobrevivem na direção de propagação, levando a velocidades de pulso semelhantes ao material sem danos. Isso explica porque a heterogeneidade, embora reduza a amplitude em ordem de magnitude, tem uma influência limitada sobre a velocidade de pulsos da ordem de 10%.

Na Figura 2.12, o comportamento distinto entre velocidade de pulso e energia do sinal ultrassônico diante da heterogeneidade das amostras testadas é ilustrado de acordo com as diferentes dimensões das películas de plástico.

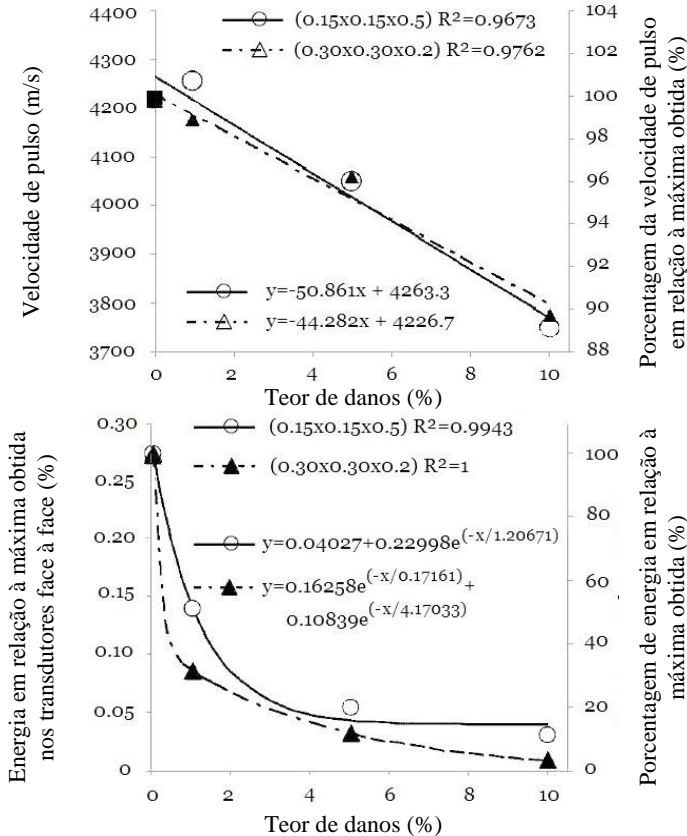
Para quantificar o parâmetro da energia do sinal ultrassônico, foi calculada a área do sinal retificado, de acordo com a Equação dada em 2.13b, ou seja, a energia total do sinal ultrassônico. Em seguida, normalizaram em função da energia total obtida com o formato da onda adquirida pelos transdutores disposto face a face. Desta forma, a energia do sinal foi expressa como a percentagem da energia transmitida através da amostra em relação à energia total do pulso obtido pelos transdutores face a face.

É importante destacar que ao se utilizar os transdutores dispostos face a face, o equipamento de ultrassom não encontra um tempo de pulso, uma vez que não há presença de material sólido entre os transdutores pelo qual a onda possa percorrer, com isso, somente o sinal ultrassônico é gerado no display do aparelho.

Os resultados obtidos pelos ensaios de velocidade de pulso e energia do sinal, também são apresentados em relação à percentagem dos valores máximos obtidos. É possível observar que o teor de 1% de inclusão teve efeito duvidoso na velocidade de pulso e uma atenuação acentuada da energia. No entanto, com 10% de inclusões inseridas nas amostras, a energia do sinal ultrassônico atenuou cerca de 90% e para velocidade de pulso, a redução foi de aproximadamente 10%.

As diferenças de comportamento diante da heterogeneidade entre velocidade de pulso e energia podem ser explicadas pela sensibilidade exponencial da energia do sinal que descreve os resultados experimentais.

Figura 2.12: Curvas de velocidade e energia versus teor de inclusões de danos.



Fonte: Aggelis e Shiotani (2008).

Em relação à variação dos resultados, o desvio padrão da energia do sinal oscilou de 0,69% a 4,4% para teores de inclusões entre 0% e 5%, e nas amostras com composição de 10% de teor de inclusão, o desvio padrão chegou próximo de 23%, mostrando que o aumento da heterogeneidade do material acentua a discrepância dos resultados.

Portanto, a série experimental de propagação de ondas ultrassônicas em argamassas com inclusões simulando fissuras reais, apresentou a energia do sinal como sensível diante das correlações com o percentual de danos. Ainda, na conclusão apresentada pelos autores, é enfatizada que garantidas as condições de acoplamento, medidas de atenuação podem levar a resultados ainda mais precisos.

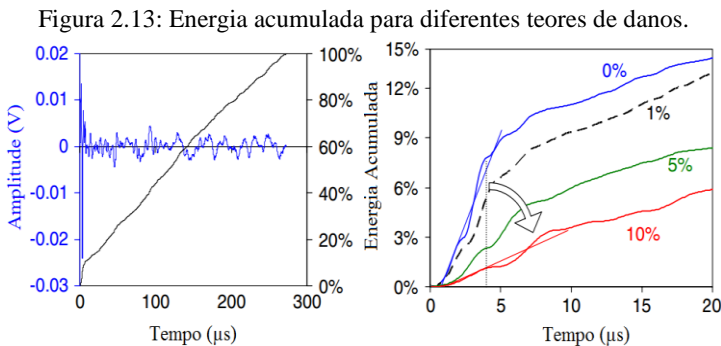
2.3.2 Shiotani e Aggelis (2009)

A propagação de pulsos ultrassônicos através de amostras de argamassa é discutida. A heterogeneidade é introduzida por inclusões de plástico em diferentes teores de volume para simular danos distribuídos, similar ao trabalho realizado anteriormente.

Neste caso, foi verificado o delay (retardo) de chegadas de energia do sinal. Para quantificar a diferença, tomou-se a amplitude absoluta do sinal, bem como a energia total calculada sob a área do sinal retificado, de acordo com a Equação 2.13b.

Os resultados são apresentados na Figura 2.13. Tanto a energia quanto as amplitudes diminuíram significativamente com o teor de danos, mesmo para o caso de 1% de inclusões. Com isso, a curva de energia para a amostra de argamassa sem danos artificiais apresentou uma inclinação mais acentuada, isso porque, nos tempos iniciais a magnitude das amplitudes são maiores, aumentando os valores das energias inicial e acumulada.

No entanto, nas amostras com inclusões de danos, a magnitude das amplitudes é menor desde o início, devido à alta dispersão das ondas ultrassônicas. Esta atenuação da energia do sinal é, principalmente, a combinação de duas razões.



Fonte: Shiotani e Aggelis (2009).

Uma delas é, como mencionado anteriormente, o redirecionamento dos componentes de energia que nunca atingem o transdutor receptor, e a outra é a absorção do material que depende do comprimento do caminho da onda. Logo, a influência da atenuação é menor para caminhos mais curtos (típico para propagação em materiais homogêneos) e maior para caminhos mais longos (meios dispersivos).

A análise da energia do sinal no domínio do tempo pode melhorar a caracterização de danos, indicando, por exemplo, a região mais heterogênea de uma estrutura. Esta característica de atenuação da energia do sinal não requer análise sofisticada e, como vem sendo abordado ao longo deste trabalho, é sensível à presença de danos de dimensões reduzidas, uma vez que inclui a informação de todo o pulso e não somente o caminho mais rápido da onda.

2.3.3 Santhanam (2010)

Descreve o uso da transmissão da energia ultrassônica para estimar o nível de danos no concreto sob compressão uniaxial. O parâmetro da energia do sinal foi estudado diante da evolução de fissuras de amostras cúbicas de concreto com 150 mm de lado sujeitas à diferentes níveis de carga, garantindo pelo menos duas vezes o comprimento de onda, para evitar os efeitos de borda e reflexões múltiplas.

Dois diferentes tipos de concreto foram testados: uma mistura de concreto de resistência convencional e outra com concreto de alta resistência que atingiram resistência média de 20 MPa e 70 MPa, respectivamente.

Os cubos foram colocados numa prensa e submetidos ao ensaio de compressão. Primeiramente, uma pequena carga foi aplicada para manter o cubo na respectiva posição. Os transdutores foram então colocados no centro das faces opostas, e fixados na posição usando um grampo para manter uma pressão constante nos transdutores, durante o ensaio, como ilustrado na Figura 2.14.

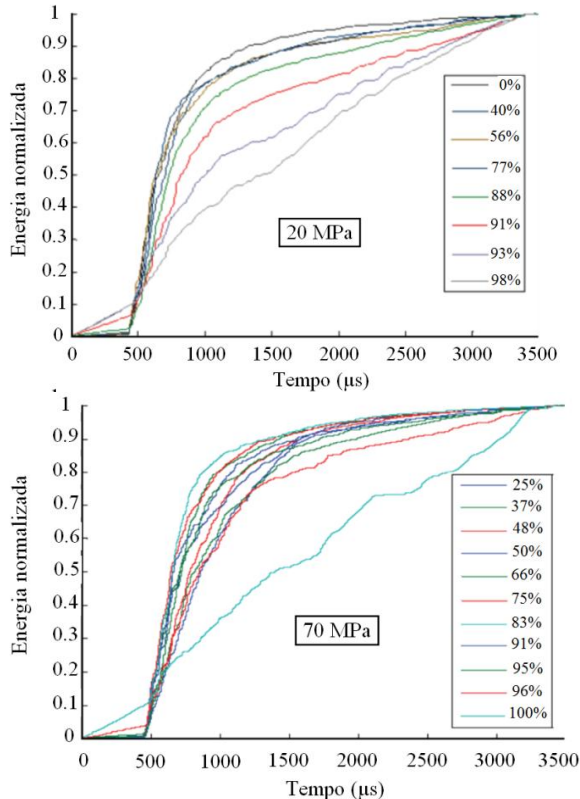
Figura 2.14: Instalação experimental para medição com ultrassom.



Fonte: Santhanam (2010).

Os sinais ultrassônicos foram processados por um osciloscópio digital acoplado ao computador utilizando um software de processamento de sinais. Uma normalização foi realizada em relação à média dos 5% a 10% dos valores de pico da curva de energia do sinal. Curvas de energia normalizada versus tempo foram usadas para analisar a dissipação de energia do sinal.

Figura 2.15: Energia acumulada para diferentes teores de danos.



Fonte: Santhanam (2010).

Os resultados mostraram que a redução da energia é gradual para concretos convencionais, enquanto que para concretos de alta resistência, uma atenuação brusca da energia do sinal é observada em níveis de carga mais elevados, Figura 2.15. Isso pode ser explicado pelo fato de concretos de alta resistência ter um crescimento acentuado de fissuras na proximidade da ruína.

2.3.4 Sagar e Prasad (2011)

Neste estudo experimental, considerou-se a energia do sinal como proporcional ao quadrado da tensão, de acordo com a Equação 2.13a. Os pesquisadores utilizaram a técnica de emissão acústica com a introdução de 8 canais de transmissão, entretanto, a ideia da análise do parâmetro da energia do sinal é similar a propagação de ondas ultrassônicas com transdutores de transmissão e recepção.

Foram ensaiadas vigas de concreto submetidas a esforços de flexão a três pontos no centro do vão, entalhadas com diferentes profundidades denominadas a_0 chegando a estes entalhes até a metade da altura da seção (Tabela 2.2). O concreto utilizado na mistura apresentou resistência à compressão de 78 MPa. A posição dos transdutores também variou conforme ilustra a Figura 2.16.

Tabela 2.2: Dimensões e profundidades do entalhe das amostras testadas.

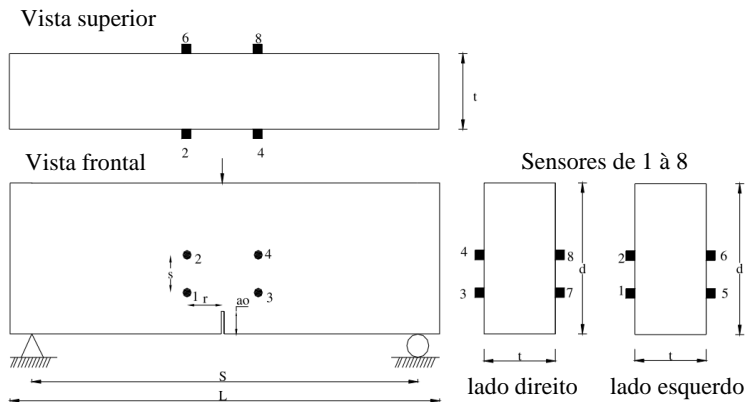
Amostra	a_0 (mm)	Quantidade	Dimensões da amostra (mm)				Posição (mm)	
			L	S	t	d	r	s
Pequena	12	3					38	32
	24	3	290	240	80	80	22	28
	40	3					20	20
Média	24	3					65	65
	48	3	530	480	80	160	50	50
	80	3					40	40
Grande	48	3					130	130
	96	3	1010	960	80	320	110	110
	160	3					80	80

Fonte: Sagar e Prasad (2011).

A Figura 2.17 apresenta as curvas correspondentes aos parâmetros de carga versus tempo versus energia acumulada do sinal. É importante ressaltar que a energia foi normalizada em função dos maiores valores encontrados.

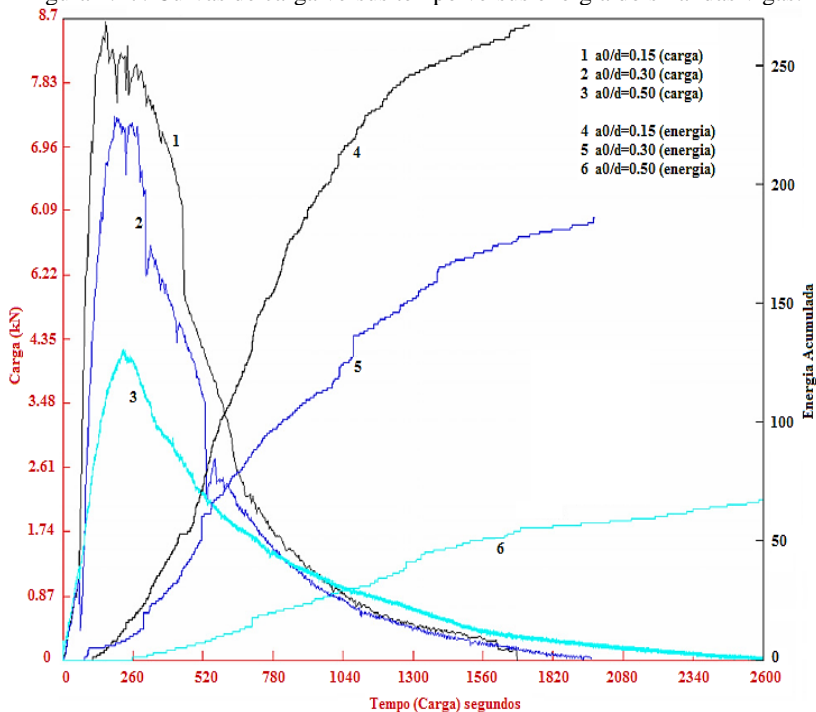
Observa-se que, antes da carga correspondente ao momento de fissuração pouca atividade de atenuação da energia foi observada. No início da formação de fissuras, a redução da energia se torna mais evidente. Assim, os autores concluíram que o comportamento inicial de amostras com diferentes profundidades de entalhe é semelhante, mas logo varia com a evolução da fissuração.

Figura 2.16: Configuração da disposição dos transdutores e do entalhe.



Fonte: Sagar e Prasad (2011).

Figura 2.17: Curvas de carga versus tempo versus energia do sinal das vigas.



Fonte: Sagar e Prasad (2011).

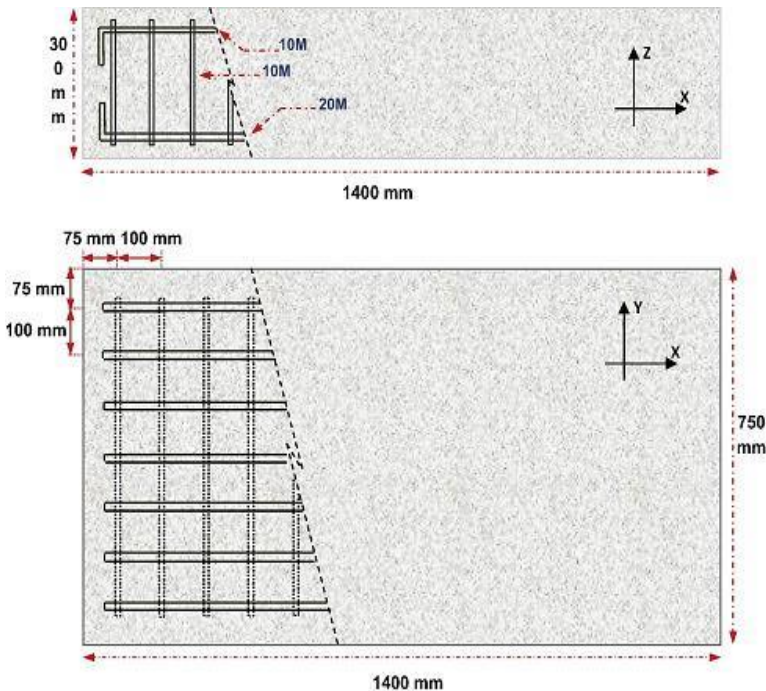
2.3.4 Moradi-Marani, Ricard, Lamarche e Kodjo (2014)

Trataram de estudar o comportamento e sensibilidade de ondas ultrassônicas para a caracterização de danos mecânicos em lajes de concreto armado.

Ao longo de sua revisão bibliográfica constataram, assim como outros autores, que a atenuação e distorção das ondas em elementos de concreto armado podem limitar a aplicação de métodos comuns, com base na velocidade de pulso, por isso, focaram na análise do parâmetro da energia de ondas ultrassônicas ao longo do desenvolvimento de danos.

Os testes foram realizados em três lajes de concreto armado, duas confeccionadas com agregados reativos e uma terceira com agregados não reativos. As dimensões e o esquema de montagem da armadura são ilustrados na Figura 2.18.

Figura 2.18: Disposição da armadura e dimensões das lajes.



Fonte: Moradi-marani et al. (2014).

As resistências à compressão e tração média, bem como o módulo de elasticidade aos 28 dias e no momento do ensaio, aos 800 dias devido ao processo de reação dos agregados, são mostradas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Propriedades mecânicas do concreto aos 28 e 800 dias.

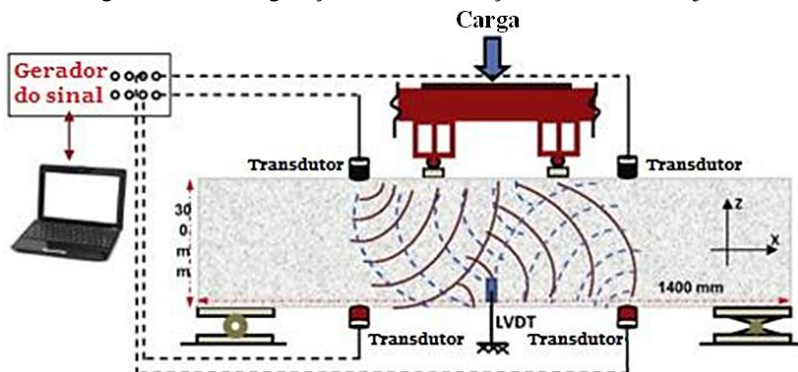
Laje	Resistência à compressão (MPa)		Resistência à tração indireta (MPa)		Módulo de Elasticidade (MPa)	
	28 dias	800 dias	28 dias	800 dias	28 dias	800 dias
NS	36,5	62,2	–	5,8	35,9	37,1
RS1	39,5	46,7	–	4,9	39,1	23,7
RS2	38,8	46,9	–	4,6	33,8	25,3

Fonte: Moradi-marani et al. (2014).

Para o ensaio de ultrassom foram conectados transdutores externos ligados à superfície do concreto para avaliar a evolução das tensões, representando uma abordagem prática para o monitoramento de estruturas existentes.

A Figura 2.19 apresenta a disposição dos dispositivos de ensaio com a configuração dos transdutores localizados nas faces superior e inferior, configurando o modo indireto de transmissão.

Figura 2.19: Configuração e instrumentação do ensaio das lajes.



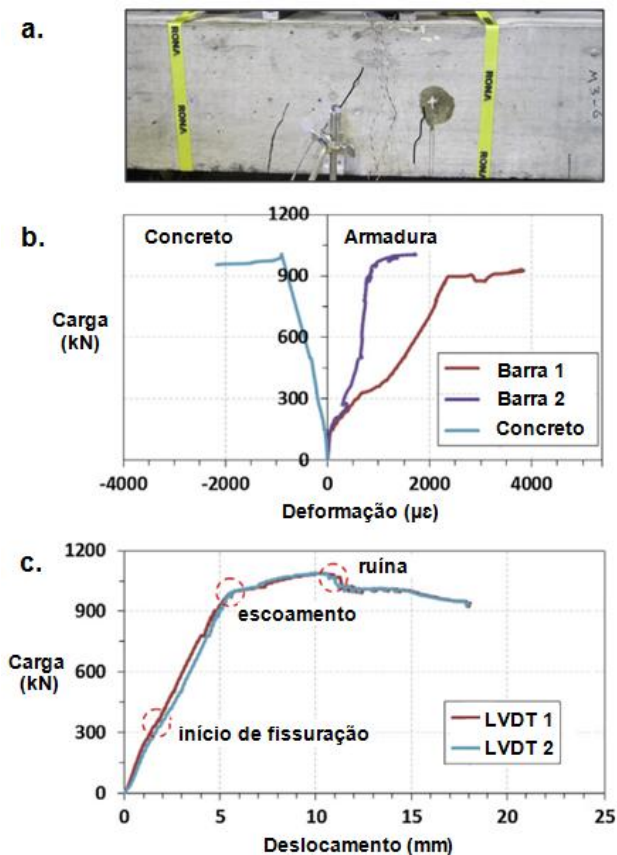
Fonte: Moradi-marani et al. (2014).

Foram usados dois *LVDT*'s de 19 mm para medir o deslocamento máximo, e também, dois extensômetros elétricos (*straingauges*), para medir deformação na armadura e um na face comprimida do concreto.

A cada etapa de carregamento (30 kN) a carga era mantida constante durante 2 minutos, tornando possíveis as medições com os transdutores. Nesse intervalo de tempo, as ondas ultrassônicas eram transmitidas primeiramente no par de transdutor superior, ou no par inferior, a fim de evitar interferência na aquisição dos sinais entre transdutores de faces opostas.

As Figuras 2.20a e 2.20b mostram a propagação de fissuras na laje com agregados não reativos e as deformações específicas experimentais no concreto e nas barras de aço instrumentadas. A Figura 2.20c apresenta os deslocamentos no vão central em relação ao acréscimo de carregamento.

Figura 2.20: Propagação de fissuras e deformações específicas das lajes.



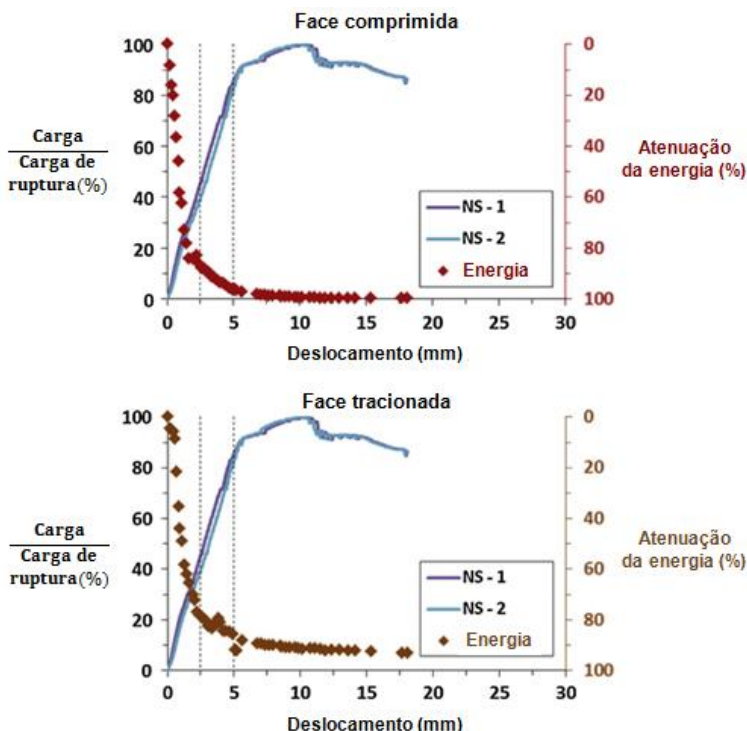
Fonte: Moradi-marani et al. (2014).

É possível notar pontos bem definidos de mudança de estádios de deformação. Desta forma, para correlacionar o sinal representativo das ondas ultrassônicas com a evolução de fissuras, as curvas de carga versus deslocamento foram divididos em três zonas: (1) início da fissuração; (2) escoamento da armadura; (3) falha/ruína.

Para a laje de concreto NS, conforme ilustrado na Figura 2.20c, a deflexão de aproximadamente 2,5 mm e 5,0 mm correspondem, respectivamente, à zona de início de fissuração estrutural e a zona de plastificação da armadura.

A Figura 2.21 mostra que a energia dos sinais em ambas as faces diminuiu cerca de 80% para uma deflexão de 2,5 mm. Esta atenuação da energia corresponde a 35% da carga de ruptura no gráfico de carga-deflexão, indicando que o parâmetro da energia de ondas ultrassônicas apresentou sensibilidade na detecção do início da fissuração em comparação com as medidas comuns de carga-deformação.

Figura 2.21: Curvas de atenuação da energia em relação as faces da laje NS.



Fonte: Moradi-marani et al. (2014).

Entretanto, a taxa de decréscimo da energia diminui significativamente entre as deflexões de 2,5 mm e 5,0 mm. Com isso, usando o gráfico da energia, é difícil identificar a fase de transição entre o escoamento da armadura principal e o ponto de ruptura da laje.

Para a quantificação da energia dos sinais obtidos com o equipamento de ultrassom, os autores utilizaram a Equação 2.13a. As ondas ultrassônicas foram distorcidas durante os ensaios e a energia do sinal foi absorvida pelo desenvolvimento de microfissuras. A Figura 2.22 apresenta a distorção e a dissipação das ondas ultrassônicas no que diz respeito ao desenvolvimento de fissuras. As atenuações das amplitudes dos sinais foram claramente observadas na face tracionada com o desenvolvimento de fissuras.

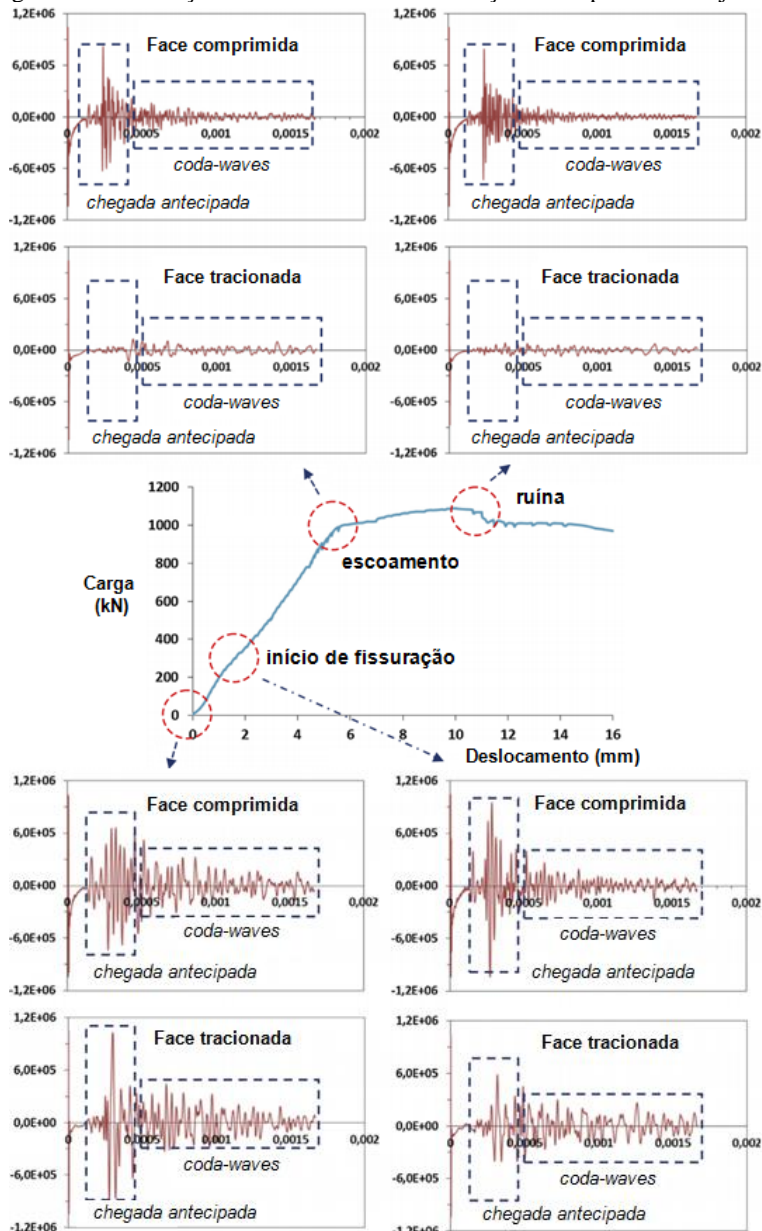
No entanto, os sinais representativos da face comprimida foram estudados separadamente devido às ondas de chegada tardia (coda-waves), isto porque, na face comprimida, inicialmente as amplitudes são amplificadas pela diminuição das microfissuras provocada pelo aumento das tensões de compressão. Posteriormente, a atenuação das amplitudes surge novamente com fissuras por esmagamento do concreto.

Mesmo os autores não esclarecendo como foram divididos os intervalos para isolar a região de coda-waves, é possível observar que o sinal foi dividido em duas zonas em relação ao domínio do tempo: (1) amplitudes de ondas de chegada antecipada (0 à 500 μ s) e (2) amplitudes de ondas de chegada tardia (500 à 1700 μ s).

Dada a ductilidade de um elemento em concreto armado, associada com altas deformações, distorce as ondas ultrassônicas mudando o formato do sinal correspondente.

Portanto, as variações de velocidade de pulso e métodos de deslocamento ao longo do tempo, apesar de serem considerados métodos robustos para verificação da resistência do concreto, apresentam menor sensibilidade na detecção de fissuras em relação a análises do comportamento total do pulso, ou pelo menos, na parte mais representativa (região de amplitudes com chegada antecipada).

Figura 2.22: Distorção dos sinais nas faces de tração e compressão da laje NS.



Fonte: Moradi-marani et al. (2014).

3 ESTUDO PRELIMINAR

Neste capítulo serão abordadas questões metodológicas para definição do modelo de equação mais apropriado para a utilização como parâmetro de detecção de fissuras em elementos de concreto.

Dando continuidade aos estudos desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa em Ensaios Não Destrutivos (GPEND) da UFSC, no que diz respeito aos parâmetros de quantificação do sinal ultrassônico, um estudo preliminar foi proposto para definir os critérios de análise do parâmetro da energia do sinal ultrassônico a serem utilizados na investigação experimental deste trabalho.

3.1 ENSAIO DE ULTRASSOM EM PLACAS DE CONCRETO

Neste estudo preliminar foram utilizados os dados de sinais ultrassônicos em placas de concreto obtidos por Carelli (2014), para avaliar um comparativo entre os modelos de equações a serem aplicados.

Carelli (2014) avaliou a sensibilidade do parâmetro da energia do sinal ultrassônico por meio de um programa experimental que consistiu em moldar duas placas de concreto submetidas ao processo de retração plástica, afim de induzir a fissuração, comparando características de atenuação e distorção do sinal entre placas fissuradas e não fissuradas.

3.1.1 Moldagem das placas de concreto

As duas placas de concreto foram confeccionadas com dimensões de 60x95x4 cm moldadas em fôrmas de madeira compensada e para restringir o movimento durante o processo de endurecimento do concreto, foram fixados perfis metálicos do tipo cantoneira no fundo do molde ao longo do perímetro da fôrma, com o objetivo de restringir possíveis movimentações e induzir a ocorrência de fissuras, Figura 3.1.

As laterais das fôrmas de madeira compensada foram revestidas com fita de polietileno e o fundo selado com verniz marítimo, ambos para impermeabilizar as faces, garantindo a evaporação da água somente pela superfície. A fim de possibilitar a comparação de dados, ambas as placas foram moldadas com características idênticas, ou seja, com os mesmos tipos de materiais e procedimentos de moldagem.

Desta forma, apenas as condições de cura foram propositalmente diferenciadas, sendo que a placa onde a fissuração era desejada ficou restrita a um local com condições de cura favoráveis ao desenvolvimento de fissuras. No entanto, devido à limitação dos recursos operacionais disponíveis para indução de fissuras por retração plástica nas placas, fez-se necessário limitar a espessura do elemento em 40 mm.

Por este motivo, foi necessária a utilização de transdutores de 200 kHz, com diâmetro de 20 mm, permitindo a leitura nas laterais das placas. Assim, houve a necessidade de utilizar agregados graúdos com menor dimensão máxima, por ser proporcional ou equivalente ao comprimento de onda gerado pelos transdutores, optando-se, portanto, pelo uso do pedrisco no traço do concreto das placas.

Figura 3.1: Fôrma das placas de concreto.



Fonte: Carelli (2014).

Logo, o traço do concreto utilizado foi 1:1,26:1,93 (cimento CP II-Z32, areia natural e pedrisco), com relação água/cimento de 0,51 e alto consumo de cimento, de 450 kg/m³, propositalmente para favorecer a ocorrência de fissuras por retração plástica.

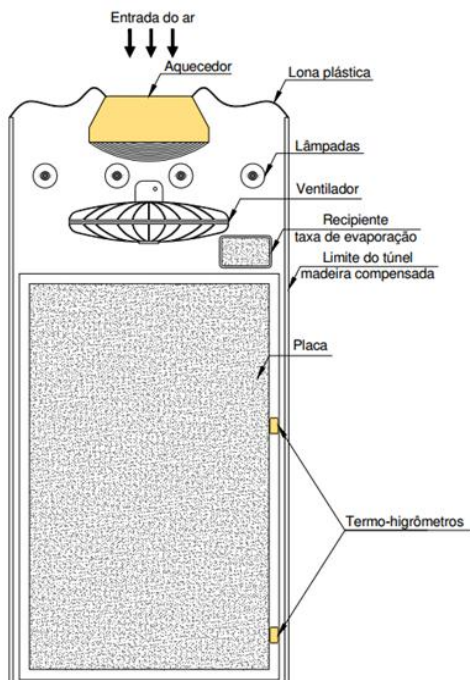
O abatimento obtido pelo slump test foi de 13 cm, e em ambas as placas, o adensamento do concreto foi feito em uma mesa vibratória, pelo mesmo período de tempo (em torno de 5 segundos).

3.1.2 Processo de fissuração nas placas de concreto

As duas placas foram moldadas com os mesmos materiais, no entanto, submetidas a processos de cura distintos. Uma das placas foi curada em ambiente de laboratório com uma lâmina de água sobre a superfície para evitar a formação de fissuras.

A outra, destinada à fissuração, foi colocada no interior de um aparato com formato de túnel fechado em “U”, Figura 3.2, com 50x70x50 cm, com 140 cm de comprimento, construído em madeira compensada, expondo a placa à incidência direta de vento, temperatura e umidade baseado em programas experimentais de outros pesquisadores, como Eren e Marar (2010) e Pelisser *et al.* (2010).

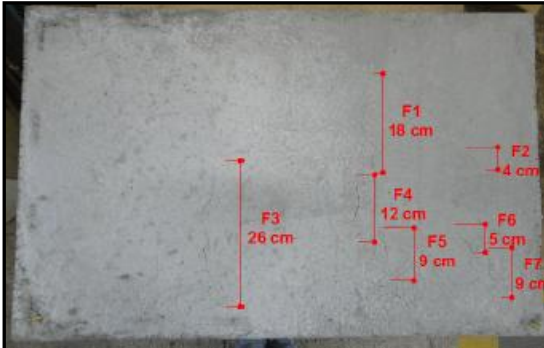
Figura 3.2: Esquemática do túnel para secagem da placa a ser fissurada.



Fonte: Carelli (2014).

A placa exposta as condições hostis de temperatura, vento e umidade, apresentou fissuração aparente, com aberturas variadas, mas em sua maioria paralelas à menor dimensão da peça. Na Figura 3.3, é possível observar essa tendência na localização das fissuras mais visíveis que estão identificadas e numeradas.

Figura 3.3: Placa de concreto fissurada por retração plástica.



Fonte: Carelli (2014).

3.1.3 Ensaio de ultrassom nas placas de concreto

Um aparelho PUNDIT Lab® da marca Proceq, Figura 3.4, foi utilizado nos ensaios das placas e das vigas. É importante destacar que as amplitudes das ondas exibidas pelo aparelho são dadas como porcentagem da tensão programada.

Figura 3.4: Ensaio de ultrassom com PUNDIT Lab® em uso.



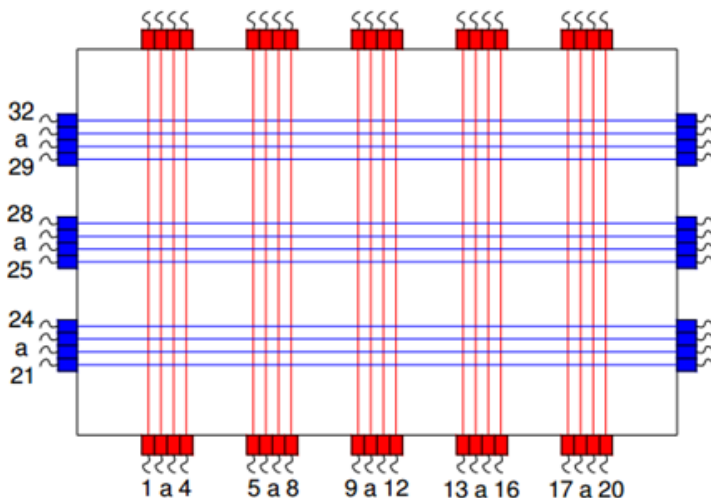
Fonte: Carelli (2014).

Para o ensaio de ultrassom nas placas de concreto, foram utilizados transdutores de transmissão e recepção com frequência de 200 kHz acoplados com gel na superfície do concreto.

Também foi definida a amplitude de saída do pulso com tensão de 500 V (a máxima amplitude oferecida pelo aparelho) com tempo de exibição da curva de 5ms e um ganho de sinal recebido de 50 vezes. Salienta-se que estes ajustes serão melhor detalhados no programa experimental (Capítulo 4).

Para obtenção dos sinais de ultrassônicos nas placas, a localização dos pontos de leitura foi escolhida a fim de desviar dos perfis metálicos em “L”, sendo dispostos conforme a Figura 3.5.

Figura 3.5: Pontos de leitura de ultrassom nas placas de concreto.



Fonte: Carelli (2014).

Os transdutores foram posicionados verticalmente no extremo superior da lateral da placa em cada leitura e devido a altura da placa possuir 40 mm, não se pôde respeitar a distância mínima do comprimento da onda, de 20 mm, entre o transdutor e a borda.

No entanto, como todas as leituras foram realizadas nesta mesma posição e o estudo foi realizado de maneira comparativa, o efeito de borda esteve presente em todos os resultados do ultrassom, sendo assumido como constante entre todas as análises.

3.2 DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

3.2.1 Dados obtidos e resultados preliminares

Neste item são apresentados os resultados preliminares da energia do sinal ultrassônico utilizados nas duas direções de transmissão.

Do trabalho de Carelli (2014) foram extraídos todos os formatos de ondas correspondentes nas duas direções e nas duas placas (fissurada e não fissurada), chegando a um total de 514 formatos de ondas ou sinais ultrassônicos. Considerando o tempo de exibição da curva e o Δt (correspondente entre cada resposta das amplitudes) sendo fixado pelo aparelho em $0,5 \mu\text{s}$, cada sinal foi representado por um vetor de tempo e outro de amplitude, ambos com dimensão vetorial de 1 por 9992.

Diante da grande dimensão da matriz representativa dos sinais, o processamento dos dados para cada modelo de equação foi realizado em rotina computacional em MATLAB, produzida especialmente para as placas fissuradas e não fissuradas, conforme APÊNDICE A.

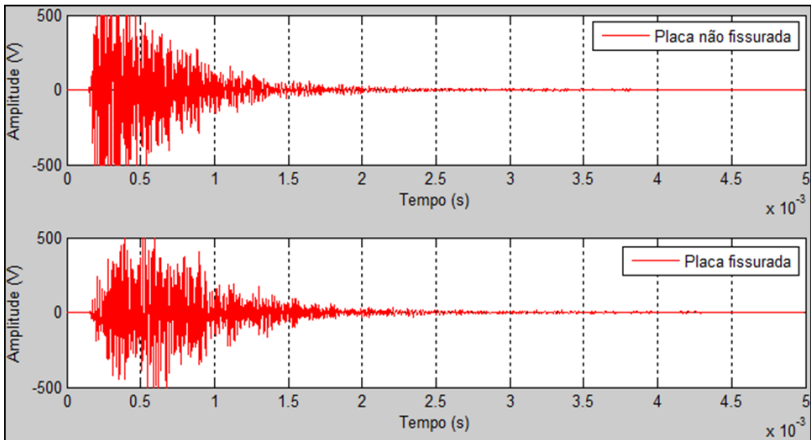
De cada ponto de leitura foi realizado uma análise estatística obtendo o valor médio deste ponto, bem como o desvio padrão, coeficientes de variação e valores máximos e mínimos, com isso, toda a análise subsequente foi realizada com base nos valores médios em cada ponto.

Para comparar os resultados de energia, sejam dados pela Equação 2.13a ou 2.13b, diante da fissuração e considerando a natureza aleatória da distribuição das fissuras, alguns pontos de leitura não cruzavam necessariamente as fissuras. Por isso, foi considerado o comportamento médio das leituras em cada direção, ou seja, procedeu-se o cálculo da média, desvio padrão e coeficiente de variação correspondentes a uma mesma direção de propagação.

É possível observar pela Figura 3.3, que nas leituras de 1 a 20 a propagação da onda é paralela às fissuras, enquanto que nas leituras de 21 a 32, esta é transversal a elas. Assim, com o intuito de normalizar a avaliação, as análises foram realizadas comparando leituras de 1 a 20 da placa não fissurada com a fissurada, e separadamente foi feita a comparação entre as leituras de 21 a 32 destas placas.

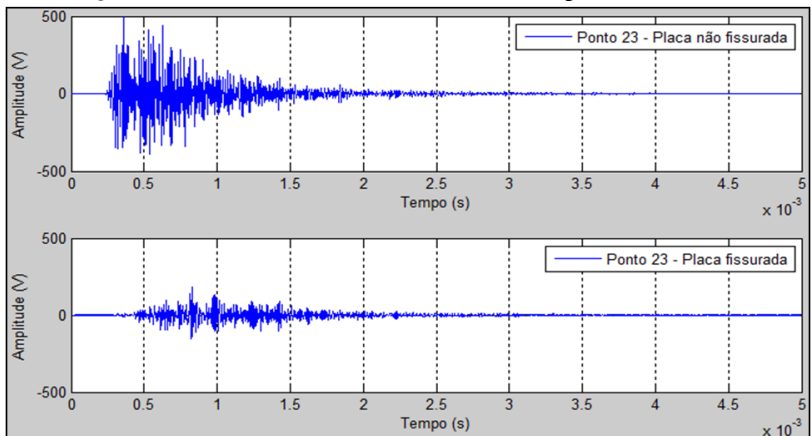
Nas Figuras 3.6 e 3.7 são apresentados sinais ultrassônicos obtidos nos pontos paralelo e perpendicular à formação das fissuras nas placas.

Figura 3.6: Formato da onda ultrassônica no ponto 17.



É possível observar que o sinal ultrassônico representativo da onda propagada na direção perpendicular à formação das fissuras, ponto 23, possui amplitudes com menor magnitude em relação ao sinal referente a onda de transmissão paralela as fissuras, ponto 17.

Figura 3.7: Formato da onda ultrassônica no ponto 23.



Os resultados da energia do sinal ultrassônico para cada ponto com o respectivo desvio padrão, obtidos de acordo com a Equação 2.13b, na janela temporal de 0 a 500 μ s para os pontos 1 a 20 e 21 a 32 são apresentados nas Figuras 3.8 e 3.9, respectivamente.

Figura 3.8: Resultados da energia (0 a 500 μ s) - Equação 2.13b - (1 a 20).

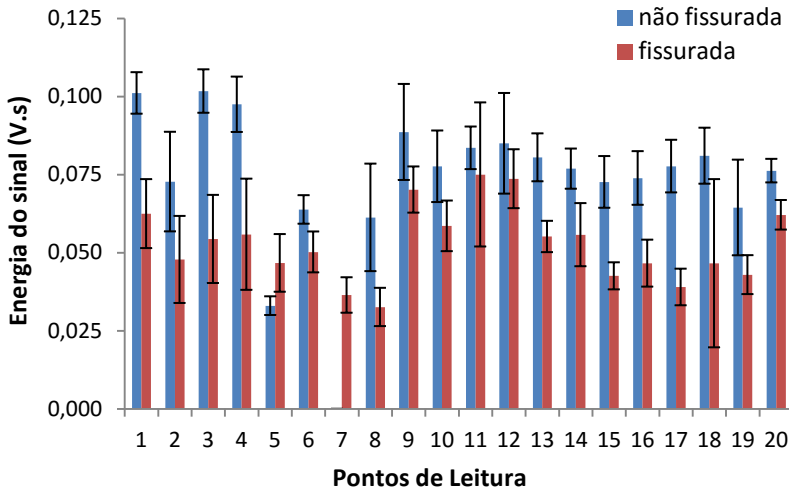
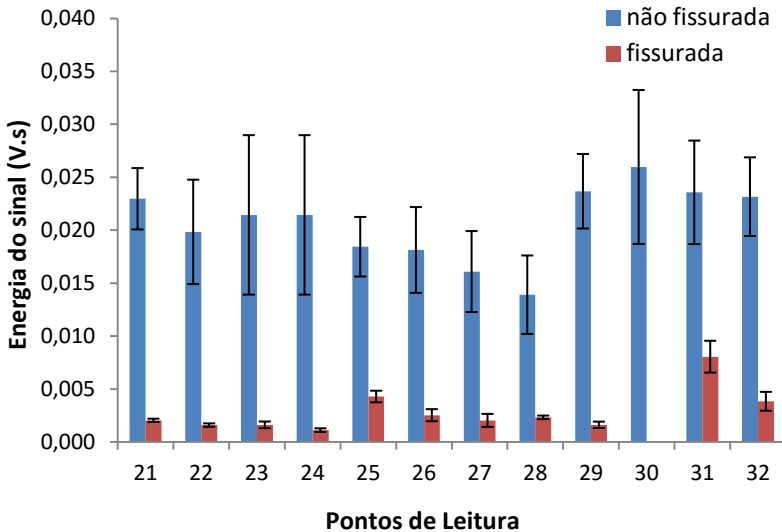


Figura 3.9: Resultados da energia (0 a 500 μ s) - Equação 2.13b - (1 a 20).



Os resultados da energia do sinal ultrassônico para cada ponto com o respectivo desvio padrão, obtidos de acordo com a Equação 2.13b, na janela temporal de 0 a 1600 μ s, para os pontos 1 a 20 e 21 a 32 são apresentados nas Figuras 3.10 e 3.11, respectivamente.

Figura 3.10: Resultados da energia (0 a 1600 μ s) - Equação 2.13b - (1 a 20).

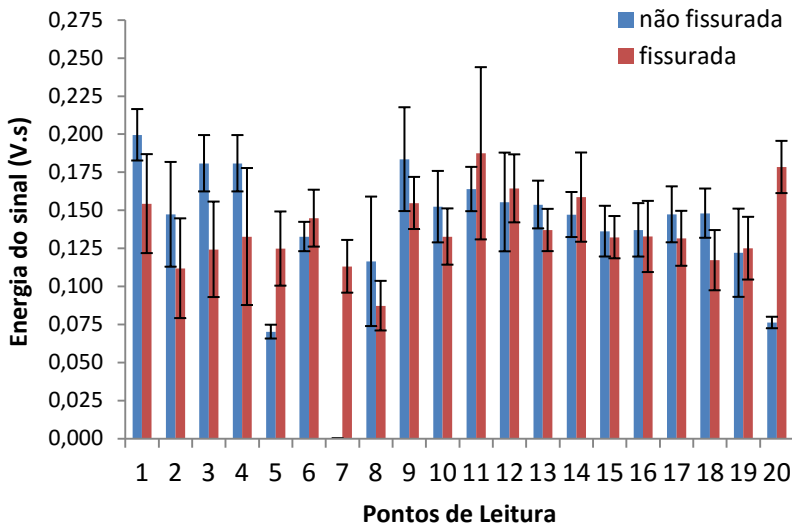
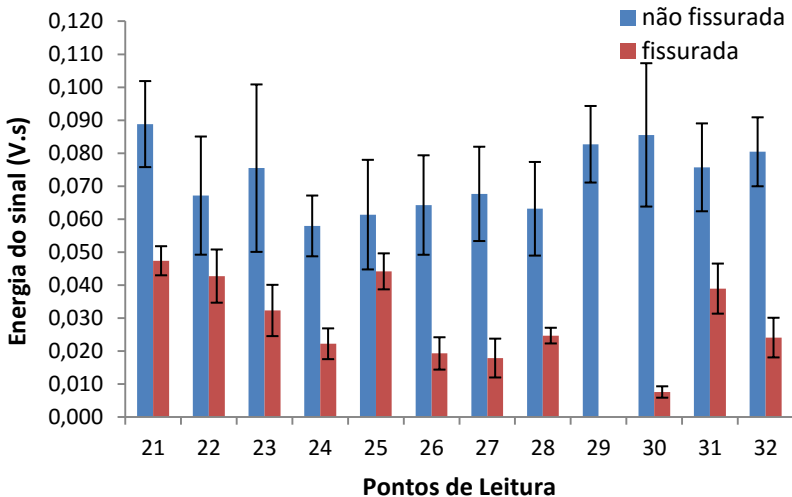


Figura 3.11: Resultados da energia (0 a 1600 μ s) - Equação 2.13b - (21 a 32).



Os resultados da energia do sinal ultrassônico para cada ponto com o respectivo desvio padrão, obtidos de acordo com a Equação 2.13a, na janela temporal de 0 a 500 μ s para os pontos 1 a 20 e 21 a 32 são apresentados nas Figuras 3.12 e 3.13, respectivamente.

Figura 3.12: Resultados da energia (0 a 500 μ s) - Equação 2.13a - (1 a 20).

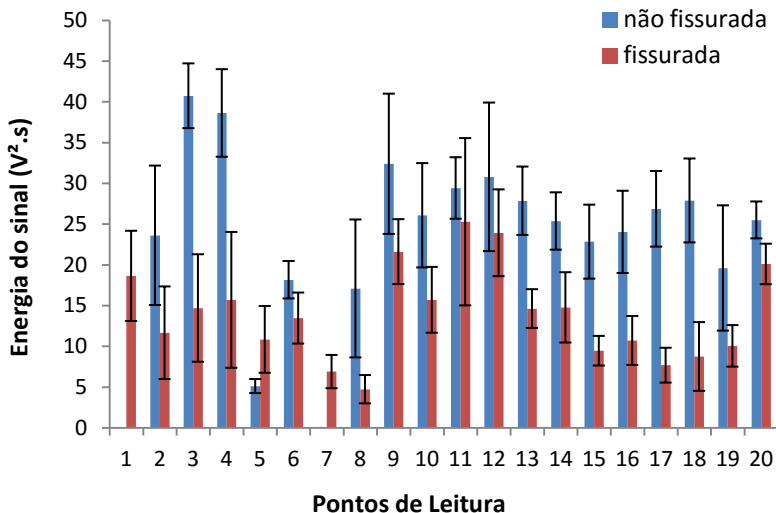
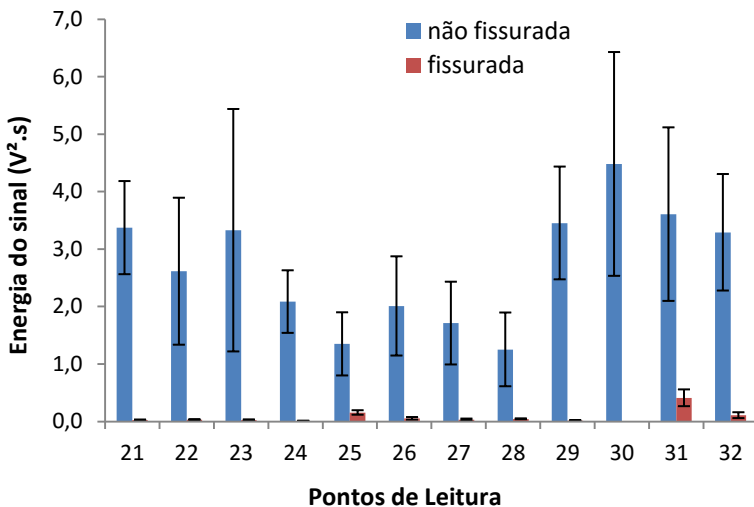


Figura 3.13: Resultados da energia (0 a 500 μ s) - Equação 2.13a - (21 a 32).



Os resultados da energia do sinal ultrassônico para cada ponto com o respectivo desvio padrão, obtidos de acordo com a Equação 2.13a, na janela temporal de 0 a 1600 μ s para os pontos 1 a 20 e 21 a 32 são apresentados nas Figuras 3.14 e 3.15, respectivamente.

Figura 3.14: Resultados da energia (0 a 1600 μ s) - Equação 2.13a - (1 a 20).

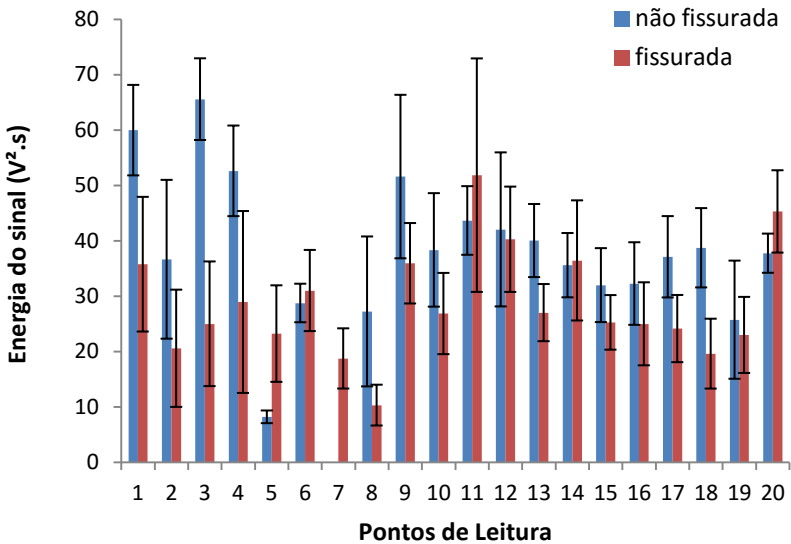
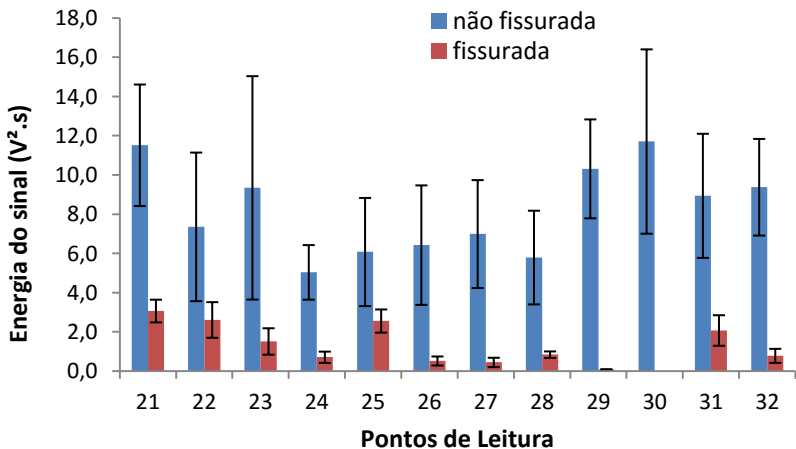


Figura 3.15: Resultados da energia (0 a 1600 μ s) - Equação 2.13a - (21 a 32).



Os resultados médios da energia do sinal ultrassônico, obtidos de acordo com as Equações 2.13a e 2.13b, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados de forma resumida nas Tabelas 3.1 e 3.2 para as leituras de 1 a 20 e de 21 a 32, respectivamente. Nestas tabelas, também são apresentados os valores de velocidade de pulso para fins de comparação.

Tabela 3.1: Resultados médios de energia do sinal nos pontos 1 a 20.

Placa	Velocidade de pulso (m/s)	Energia			
		(V .s)		(V ² .s)	
		0-500	0-1600	0-500	0-1600
Concreto não fissurado	4108	0,0773	0,1448	26,39	38,62
Desvio Padrão	25,60	0,0095	0,0201	6,82	8,25
Coeficiente de Variação (%)	0,60	12,60	13,87	22,39	22,32
Concreto fissurado	3902	0,0527	0,1373	13,96	28,71
Desvio Padrão	56,70	0,0102	0,0244	4,18	8,80
Coeficiente de Variação (%)	1,50	19,40	17,90	30,86	31,36

Tabela 3.2: Resultados médios de energia do sinal nos pontos 21 a 32.

Placa	Velocidade de pulso (m/s)	Energia			
		(V .s)		(V ² .s)	
		0-500	0-1600	0-500	0-1600
Concreto não fissurado	3890	0,0207	0,0725	2,71	8,24
Desvio Padrão	8,80	0,0047	0,0152	1,08	3,15
Coeficiente de Variação (%)	0,20	22,94	21,26	40,34	38,86
Concreto fissurado	3200	0,0028	0,0314	0,08	1,38
Desvio Padrão	285,50	0,0005	0,0057	0,03	0,44
Coeficiente de Variação (%)	8,9	16,91	19,80	34,81	36,84

Para energia acumulada do sinal, foram selecionados três pontos aleatoriamente em cada uma das duas direções de propagação. Sendo na direção paralela a formação de fissuras os pontos 12, 14 e 17, e na direção perpendicular os pontos 23, 25 e 28.

Dentre os pontos selecionados para análise da energia acumulada, os resultados dados pela Equação 2.13a para os pontos 17 e 23, são apresentados nas Figuras 3.16 e 3.17, respectivamente.

As curvas vermelhas representam a energia acumulada do sinal referente as placas não fissuradas, e consequentemente, as curvas em cor azul representam os resultados de energia acumulada do sinal relativos a placa de concreto fissurada.

Figura 3.16: Energia acumulada do ponto 17, Equação 2.13a.

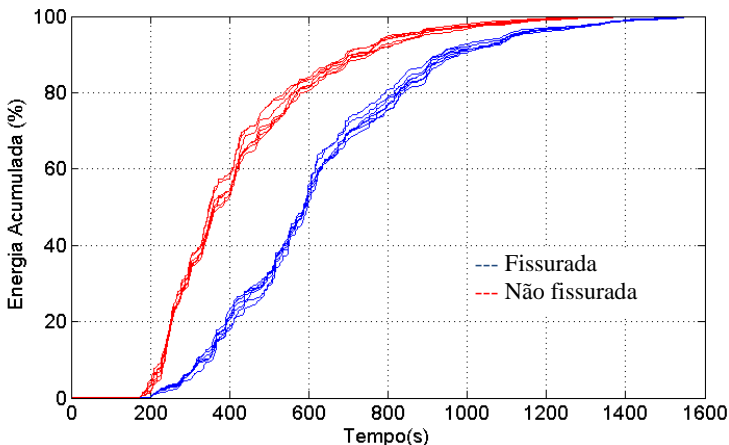
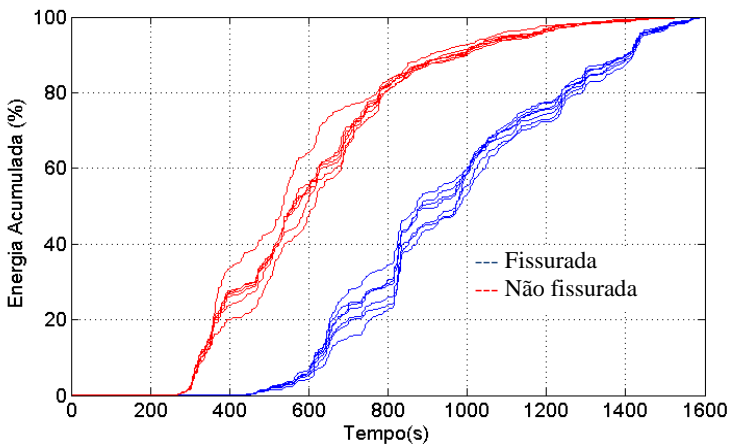


Figura 3.17: Energia acumulada do ponto 23, Equação 2.13a.



Já os resultados para os pontos 17 e 23, dados pela Equação 2.17b, são ilustrados nas Figuras 3.18 e 3.19.

Figura 3.18: Energia acumulada do ponto 17, Equação 2.13b.

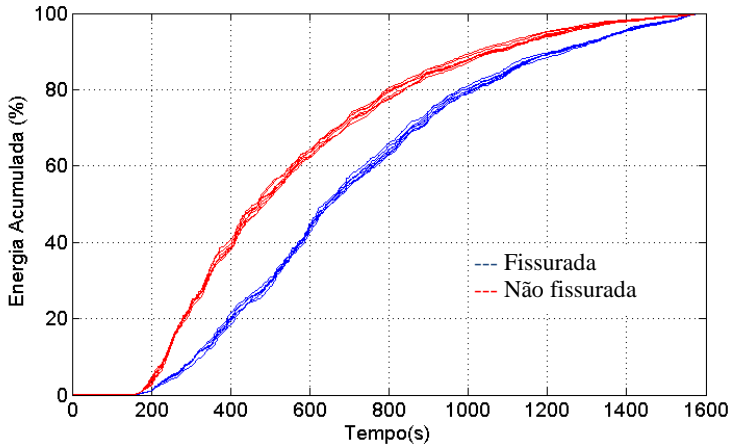
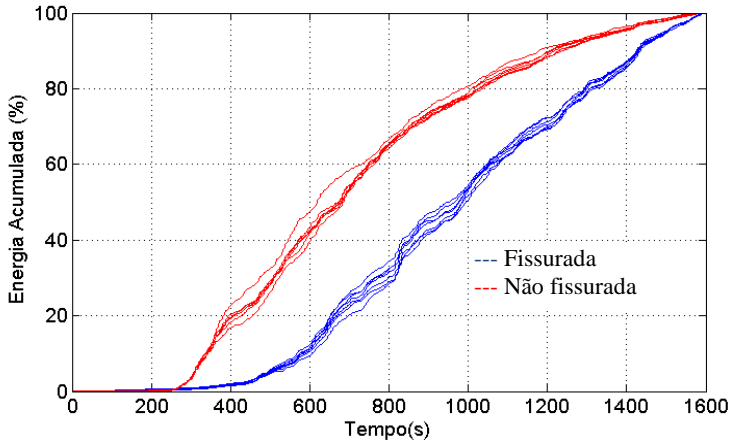


Figura 3.19: Energia acumulada do ponto 23, Equação 2.13b.



Os resultados de energia acumulada para os outros pontos selecionados são apresentados no APÊNDICE B.

Baseado no estudo da energia acumulada, é apresentado na Tabela 3.3, resultados dos tempos correspondentes a 50% e 90% da energia acumulada para os pontos paralelos as fissuras, calculados pela Equação 2.13b.

As rotinas computacionais que definem o tempo imediato aos valores de 50% e 90% da energia acumulada podem ser verificadas.

Tabela 3.3: Janela Temporal em pontos paralelos as fissuras - Eq. 2.13b.

Pontos 12, 14 e 17	Tempo para 50%		Tempo para 90%	
	Não fissurada	Fissurada	Não fissurada	Fissurada
Média (μ s)	469,60	600,10	1068,00	1175,00
Desvio Padrão (μ s)	9,70	8,98	19,03	9,69
Coeficiente de Variação (%)	2,09	1,50	1,78	0,82

Para os pontos analisados que cortam as fissuras, os resultados de janela temporal dos tempos correspondentes a 50% e 90% são apresentados na Tabela 3.4, calculados com a Equação 2.17b.

Tabela 3.4: Janela Temporal em pontos que cortam fissuras - Eq. 2.13b.

Pontos 23, 25 e 28	Tempo para 50%		Tempo para 90%	
	Não fissurada	Fissurada	Não fissurada	Fissurada
Média (μ s)	690,70	916,80	1246,00	1408,00
Desvio Padrão (μ s)	16,42	15,20	23,51	9,49
Coeficiente de Variação (%)	2,38	1,66	1,88	0,68

Estes mesmos dados também foram calculados pela a Equação 2.13a e são apresentados nas Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5: Janela Temporal em pontos paralelos as fissuras - Eq. 2.13a.

Pontos 12, 14 e 17	Tempo para 50%		Tempo para 90%	
	Não fissurada	Fissurada	Não fissurada	Fissurada
Média (μ s)	365	519,20	707,10	886,80
Desvio Padrão (μ s)	12,41	6,41	25,92	15,86
Coeficiente de Variação (%)	3,44	1,30	3,67	1,76

Tabela 3.6: Janela Temporal em pontos que cortam fissuras - Eq. 2.13a.

Pontos 23, 25 e 28	Tempo para 50%		Tempo para 90%	
	Não fissurada	Fissurada	Não fissurada	Fissurada
Média (μ s)	613,30	863,30	1004,00	1331,00
Desvio Padrão (μ s)	17,57	35,39	24,46	28,19
Coeficiente de Variação (%)	2,90	4,08	2,46	2,19

3.2.2 Análise dos resultados

A partir dos formatos das ondas obtidos nos ensaios realizados nas placas por Carelli (2014) e do processamento numérico dos sinais, expressos pelos resultados obtidos, é abordada neste item uma análise dos resultados para definição da sensibilidade do parâmetro da energia em relação a cada modelo na detecção das fissuras.

Os resultados passaram por uma análise de variância, com intervalo de confiança de 95%, com o objetivo de descobrir se haviam diferenças significativas entre as médias dos modelos entre si e também de cada modelo entre as placas fissuras e não fissuradas.

As Tabelas 3.7 e 3.8 apresentam a análise de variância nas duas direções de leitura das placas de concreto, para as Equações 2.13b e 2.13a, respectivamente.

Tabela 3.7: Análise de variância do sinal calculado pela Equação 2.13b.

Janela temporal (μs)	Energia ($ V .s$)			
	Leitura (1-20)		Leitura (21-32)	
	F-crítico	F	F-crítico	F
0-500	4,105	30,608	4,324	218,825
0-1600	4,105	0,672	4,324	80,832

Tabela 3.8: Análise de variância do sinal calculado pela Equação 2.13a.

Janela temporal (μs)	Energia ($V^2.s$)			
	Leitura (1-20)		Leitura (21-32)	
	F-crítico	F	F-crítico	F
0-500	4,105	29,419	4,324	71,536
0-1600	4,105	7,332	4,324	84,249

Apenas a energia no intervalo 0-1600 μs dada pela Equação 2.13b, selecionada em vermelho, não se mostrou sensível na detecção de fissuras, dado valor menor que o F-crítico.

Num primeiro momento, poder-se-ia afirmar que os efeitos de chegada tardia das amplitudes do pulso (coda-waves) visualizadas na distorção dos sinais não influenciaram devido a direção de propagação ser paralela das fissuras. Isso porque as coda-waves médias dos sinais (considerando de 500 a 1600 μs) nos pontos de 1 a 20 têm valores de amplitudes positivas e negativas muito próximos (por exemplo o ponto 17 na Figura 3.6, com atenuação semelhante entre as placas) e, com isso, o valor da integração no trecho de 500 a 1600 fica similar considerando essa afirmação com 95% de confiança que não apresentaram diferenças significativas.

No entanto, dada a confiança da análise nos mesmos resultados obtidos nos pontos de 1 a 20 e no mesmo intervalo (0-1600 μ s), calculados pela Equação 2.13a, é possível observar que foi sensível na detecção de fissuras. Isso pode ser explicado pelo modelo de integração que consegue detectar essas pequenas diferenças ao elevar as amplitudes a segunda potência.

Assim, pelo fato do agrupamento de pontos de 1 a 20 não cruzarem as fissuras (agentes dispersores) e considerando o mesmo trecho de propagação (absorção da energia de propagação constante), numa comparação entre placa fissurada e não fissurada, o modelo que eleva as amplitudes ao quadrado mostra diferenças significativas, enquanto o modelo que considera apenas o sinal retificado não apresenta esta sensibilidade.

Carelli (2014) também percebeu que a energia do sinal considerando a janela temporal de 0 a 1600 μ s, calculada pelo modelo de retificação do sinal, não apresentava diferenças significativas entre as placas fissurada e não fissurada, entretanto, a autora afirma que aumentando o grau de confiança da análise de variância para 99%, os valores se tornam significativos.

O comparativo entre os modelos de cálculo da energia do sinal ultrassônico apresentada nas Tabelas 3.1 e 3.2 descreve uma maior atenuação na energia calculada pela Equação 2.13a. Comparando os dados, determinam-se na Tabela 3.9 as relações de atenuação da energia entre as placas fissurada e não fissurada, calculadas pelos dois modelos.

Tabela 3.9: Comparativo de atenuação de energia entre os modelos.

Relação	Pontos	Velocidade	Energia			
			Equação 2.13b		Equação 2.13a	
			0 - 500	0 - 1600	0 - 500	0 - 1600
F/NF (%)	1-20	↓5	↓31,82	↓5,18	↓52,90	↓25,66
	21-32	↓17,74	↓86,47	↓43,30	↓97,05	↓83,25

Diante dos resultados de atenuação, observa-se a ocorrência de atenuação mais acentuada quando se calcula a energia do sinal pela Equação 2.13a, sendo que a atenuação da energia está diretamente relacionada com a sensibilidade na detecção das fissuras. Entretanto, é necessário afirmar que para a energia calculada pela Equação 2.13b os coeficientes de variação foram menores.

Em relação à energia acumulada do sinal, verifica-se um tempo de ruído maior (começo da inclinação da curva) para a energia dos pontos que cortam as fissuras, com patamares maiores de deslocamento das curvas na janela temporal. Destaca-se também que para a Equação 2.13a o tempo de ruído é maior (cerca de 1,5 vezes) em relação a Equação 2.13b. Neste caso, as diferenças de ruído passam a ter caráter intrínseco da Equação utilizada, dado as mesmas condições de propagação das ondas nas duas direções.

Assim, para propagação de ondas nas placas fissuradas por retração plástica na direção perpendicular a formação das fissuras, o tempo limítrofe correspondente a 50% e 90% da energia pode ser estabelecido como aproximadamente 900 μ s e 1400 μ s (de acordo com as Tabelas 3.3 à 3.6), independente do modelo de equação adotado.

Para o caso das placas não fissuradas, os resultados da janela temporal também não apresentaram diferenças significativas entre os modelos (Equação 2.13a e 2.13b), logo, os tempos limites podem ser reduzidos para 600 à 700 μ s e 1000 à 1200 μ s, para 50% e 90% da energia acumulada, respectivamente.

O atraso de tempo entre curvas representativas da placa fissurada é mais evidente em relação as não fissuradas, pois as amplitudes são menores desde o início, devido ao fenômeno de dispersão comentado no Capítulo 2. Por fim, com os resultados obtidos neste estudo preliminar, baseado em dados obtidos por Carelli (2014) e aqui aprofundados e aplicados a outro modelo de Equação representativo do sinal ultrassônico, é possível afirmar de maneira resumida que:

Com um grau de confiança de 95%, a energia do sinal ultrassônico representado pela Equação 2.13b na janela de 0 a 1600 μ s foi a única a não apresentar diferenças significativas entre os resultados das placas fissurada e não fissurada, sendo que neste mesmo intervalo a energia dada pela Equação 2.13a apresentou sensibilidade na detecção das fissuras;

- Observou-se que a Equação 2.13a apresenta maior sensibilidade na detecção de fissuras, porém com maior coeficiente de variação entre os resultados. Com base no estudo experimental poderá ser analisada se essa variação é influenciada intrinsecamente pelo modelo da Equação ou por questões extrínsecas relativas ao ensaio, como: pressão nos transdutores, acoplamento, etc. Assim ainda não é possível afirmar qual dos modelos de equação apresenta melhor comportamento na detecção de fissuras;

- O tempo de ruído do sinal correspondente ao início da inclinação da curva de energia acumulada torna-se menor levando em conta os resultados dados pela Equação 2.13b, ou seja, a energia acumulada do sinal calculada por meio do módulo das amplitudes possui um atraso de tempo (*delay*) mais acentuado;

- Quanto a janela temporal, os resultados mostraram que não existem diferenças significativas entre os modelos das duas equações, chegando a valores próximos de tempo em 900 μs para 50% da energia do sinal e 1400 μs para 90% da energia, tomando como base os resultados dos tempos referentes a propagação das ondas na direção perpendicular as fissuras.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados como procedimentos para realização do programa experimental que contemplou distintas fases: moldagem e características das vigas de concreto armado, instrumentação de vigas submetidas ao ensaio de flexão à quatro pontos com medidores de carregamento, deslocamentos e de deformação, bem como os procedimentos para a realização dos ensaios com o equipamento de ultrassom no modo indireto.

4.1 MOLDAGEM DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Os materiais utilizados para composição do traço foram obtidos no comércio da região de Florianópolis. Inicialmente foram realizados ensaios de determinação da massa específica dos agregados miúdos com Frasco Chapman, conforme ABNR NBR 9775 (2011), e para o agregado graúdo, seguiu-se as recomendações da ABNT NBR NM 53 (2009). Posteriormente, verificou-se a umidade dos agregados pelo método da frigideira, seguindo com as correções na quantidade de água da dosagem.

O traço utilizado na moldagem das vigas foi 1:1,07:1,07:2,37:0,52, com consumo de cimento de aproximadamente 400 kg/m³ (CPII-Z-32). As massas específicas dos materiais, bem como o estudo do traço que pode ser verificado no APÊNDICE C.

Para a mistura foram concretadas cinco vigas de concreto armado com dimensões de 25x15x100 (largura, altura e comprimento, respectivamente) montadas com madeira compensada plastificada para diminuir as imperfeições geométricas, e armadura devidamente afastada das faces com espaçadores de plástico, Figura 4.1.

Figura 4.1: Fôrmas das vigas de concreto armado.



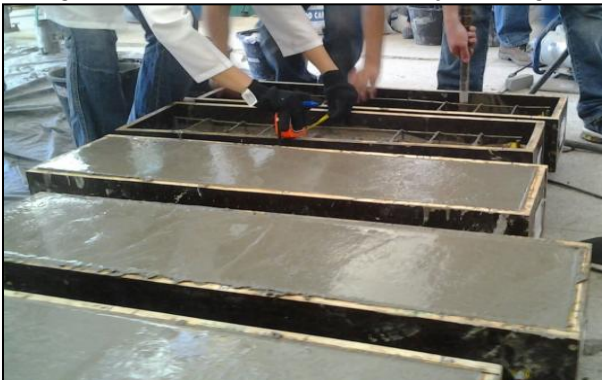
Durante a concretagem, as vigas foram adensadas com vibrador, e em seguida, niveladas com desempenadeira e colher, Figura 4.2.

Figura 4.2: Moldagem, adensamento e nivelamento das vigas.



Destaca-se o controle dimensional das seções transversais das vigas à medida que eram concretadas para garantir uniformidade ao longo do comprimento, conforme Figura 4.3.

Figura 4.3: Controle dimensional da seção das vigas.



O preparo e controle tecnológico seguiu as recomendações da ABNT NBR 12655 (2015), com controle total do concreto.

O ensaio de consistência foi realizado de acordo com a ABNT NBR NM 67 (1998), pelo ensaio de tronco de cone Slump Test. Obteve-se um abatimento em torno de 13 cm, Figura 4.4.

Figura 4.4: Ensaio de abatimento Slump Test.



Além das vigas, durante a concretagem foram confeccionados 6 corpos-de-prova cilíndricos, de seção 100 x 200 mm, para a realização de ensaios de resistência à compressão, conforme ilustra a Figura 4.5.

Figura 4.5: Moldagem dos corpos de prova.



Após o término da concretagem, as vigas foram curadas pelo período de 28 dias em ambiente de laboratório, e os corpos de prova em câmara úmida, pelo mesmo período.

Os ensaios dos corpos de prova cilíndricos foram realizados aos 28 dias, utilizando uma prensa marca Shimadzu, com capacidade de 2000 kN. A resistência média dos corpos de provas aos 28 dias foi de 32,8 MPa.

4.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS VIGAS

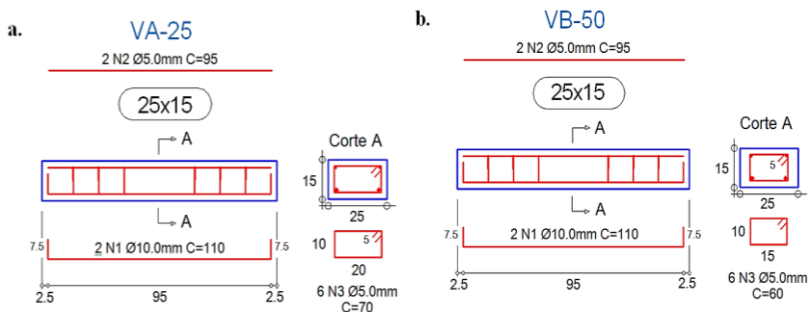
De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), no projeto de estruturas correntes, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com o tipo de ambiente de exposição relacionado com o risco de deterioração da estrutura, e pode ser avaliada, simplificada, segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes.

Desta forma, para analisar os objetivos específicos deste trabalho e relacioná-los com questões de durabilidade de tipos de estruturas correntes em concreto armado, foram escolhidos dois cobrimentos distintos da armadura nas faces laterais das vigas.

Assim, foram moldadas duas vigas, denominadas de VA, com cobrimento lateral de 25 milímetros, similar ao cobrimento relacionado com a classe de agressividade ambiental I, e também, duas vigas, chamadas de VB, com cobrimento lateral de 50 milímetros, representando elementos que podem ser exposto à ambientes de alta agressividade ambiental. A geometria, os cobrimentos e o detalhamento das armaduras são ilustrados na Figura 4.6.

É importante ressaltar que num primeiro momento uma das vigas foi ensaiada para estabelecer os procedimentos de ensaio a serem utilizados para as demais vigas.

Figura 4.6: Detalhamento das armaduras para as vigas VA e VB.



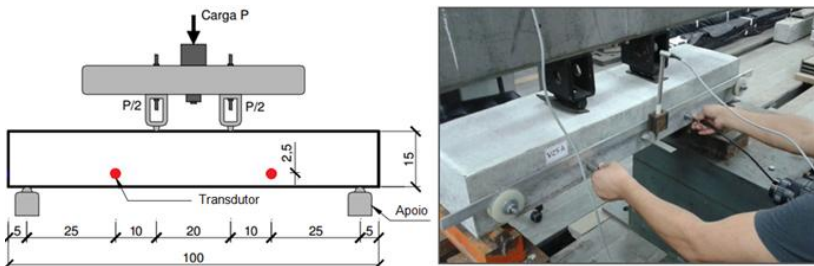
A área de aço correspondente à armadura longitudinal de flexão foi dimensionada de modo a ter um comportamento dúctil, ou seja, dentro do domínio 2 de deformação. Em relação à armadura transversal, foi determinada para garantir que a viga venha a romper primeiramente por flexão e não por cisalhamento.

4.3 ENSAIO DE ULTRASSOM E FLEXÃO À QUATRO PONTOS

Um aparelho PUNDIT Lab® da marca Proceq foi utilizado como sistema de aquisição de dados para os ensaios de ultrassom.

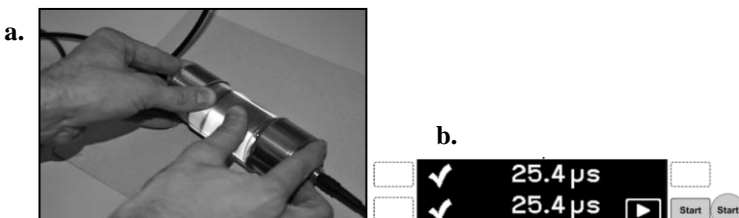
A operação se deu no modo indireto, Figura 4.7, com transdutores de 200 kHz devidamente acoplados com gel de acoplamento fornecido pelo fabricante. A escolha da frequência do transdutor esteve relacionada com a dimensão do agregado graúdo disponível para a dosagem do concreto a fim de minimizar a intensidade de atenuação atrelada à frequência de propagação do pulso.

Figura 4.7: Disposição dos transdutores ultrassônicos nas vigas.



Em relação a calibração, o PUNDIT Lab® foi zerado de acordo com as instruções do fabricante (PROCEQ, 2015) usando o bloco de calibração especialmente fornecido pelo aparelho. A calibração foi dada com acoplamento dos transdutores no bloco de calibração, aplicados com gel nos transdutores e nas extremidades do bloco. Os transdutores foram pressionados conforme mostra a Figura 4.8a e a largura de pulso foi ajustada automaticamente pelo aparelho. O display final do aparelho indicou o tempo de trânsito esperado e o tempo de trânsito medido (correspondente ao tempo utilizado na velocidade de pulso). Estes coincidiram, estando assim, calibrado o aparelho, Figura 4.8b.

Figura 4.8: Calibração do Pundit Lab.



Dentre as configurações disponíveis pelo sistema, foram determinados os ajustes para frequência do transdutor de 200 kHz, neste caso, o aparelho define automaticamente a largura de pulso em 2,5 μ s.

A tensão de excitação do sistema foi fixada em 500 V, sendo esta a máxima fornecida pelo aparelho. Na avaliação do pulso ultrassônico, essa tensão de excitação é representada pelas amplitudes do sinal. Em relação ao ganho do sinal (amplificação das amplitudes do sinal pelo sistema), foram utilizadas duas ampliações: 10 vezes e 50 vezes, com o objetivo de verificar a influência do truncamento das amplitudes.

A transmissão do pulso foi selecionada no modo *burst*, enviando pacotes de pulsos até a leitura ficar estável e parar automaticamente após a aquisição de 20 leituras. O tempo de exposição do sinal foi fixado em 5 μ s com o objetivo de garantir que as amplitudes representativas do pulso ficassem dentro do intervalo de análise.

Tendo em vista a variabilidade das condições de moldagem das vigas, mesmo sendo executadas em ambiente de laboratório, a resistência dos corpos de prova passaram por um controle estatístico por amostragem total. Sendo assim, a resistência característica à compressão do concreto moldado nas vigas foi de 28,4 MPa.

As vigas de concreto armado, foram submetidas ao ensaio de flexão à quatro pontos aos 28 dias. Como as características e as condições de carregamento foram constantes em todas as vigas, foi possível estimar os momentos, como segue na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1: Geometria e características dos materiais e das vigas.

Características	Dados
Resist. característica do concreto à compressão	$f_{ck} = 28,4 \text{ MPa}$
Largura da viga	$bw = 25 \text{ cm}$
Altura da viga	$h = 15 \text{ cm}$
Diâmetro da armadura transversal	$\Phi_t = 5 \text{ mm}$
Cobrimento da armadura	$cob = 2,5 \text{ cm}$
Distância do porta estribo à face superior da viga	$d' = 32,5 \text{ mm}$
Dist. do c.g da armadura de flexão à face superior	$d = 115 \text{ mm}$
Área da armadura de porta estribo	$A'_s = 39,27 \text{ mm}^2$
Área da armadura de flexão	$A_s = 157,08 \text{ mm}^2$
Módulo de elasticidade do aço	$E_s = 210000 \text{ MPa}$
Módulo de elasticidade inicial do concreto	$E_{ci} = 35811,98 \text{ MPa}$
Coefficiente para módulo de elasticidade secante	$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} = 0,871$
Módulo de elasticidade secante	$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} = 31192,23 \text{ MPa}$
Coefficiente de relação entre aço e concreto	$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} = \frac{210000}{31192,23} = 6,73$

Primeiramente, foram determinadas a posição da linha neutra e o momento de inércia correspondentes ao Estádio I.

- **Posição da linha neutra no estágio I:** $x_I = 75,70 \text{ mm}$
- **Momento de Inércia no estágio I:** $I_I = 72140957,56 \text{ mm}^4$

Com isso, determinou o momento, e posteriormente, a carga de fissuração:

- **Momento de fissuração:**

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_I}{y} = \frac{1,5 \left(0,3 \cdot 28,4^{\frac{2}{3}}\right) \cdot 10^3 \cdot 72140957,56 \cdot 10^{-12}}{(150 - 75,70) \cdot 10^{-3}} = 4,03 \text{ kNm}$$

- **Carga de fissuração:**

$$P_r = \frac{M_r}{0,15} = \frac{4,03}{0,15} = 26,8 \text{ kN}$$

Para o estado limite último, segue os cálculos:

- **Posição da linha neutra no estado limite último:**

$$x_I = 11,27 \text{ mm (domínio 2)}$$

- **Momento de ruptura:**

$$M_u = 9,15 \text{ kNm}$$

- **Carga de ruptura:**

$$P_u = \frac{M_u}{0,15} = \frac{9,15}{0,15} = 61,0 \text{ kN}$$

Baseado na estimativa dos momentos de fissuração e de ruptura as etapas de carregamento no ensaio de flexão a quatro pontos foram condicionadas começando o ensaio de ultrassom com a viga sem carregamento. Posteriormente, foram adotados incrementos de carga a cada 10 kN até o carregamento correspondente a 70 kN, totalizando 8 ensaios com o equipamento de ultrassom, sendo que em cada ensaio de ultrassom eram registrados 20 leituras ou formatos de ondas.

Os ensaios de ultrassom ao longo dos incrementos de carga no ensaio de flexão foram realizados a partir do seguinte procedimento: atingido o nível de carregamento esperado, cessava-se o acréscimo de carga na prensa (por cerca de 3 à 5 minutos), mantinha-se a carga atingida e as leituras com o ultrassom eram executadas.

Ao longo do ensaio a visualização das ondas era dada em tempo real, e logo após o término de cada ensaio, os dados das leituras eram exportados em arquivo Excel com extensão csv para uma pasta específica que continha as rotinas computacionais desenvolvidas especificamente para análise do formato da onda e, posteriormente, o parâmetro da energia do sinal.

Para isso, foram desenvolvidas três rotinas distintas em linguagem MATLAB da MathWorks®, sendo a principal chamada de *matwave* que busca os dados exportados pelo *Pundit Link*, identifica o número de leituras desejado (para a análise das vigas foram 20 leituras), plota o formato da onda para visualização e calcula a energia do sinal. O passo a passo da rotina é descrito no fluxograma a seguir com um exemplo de uma das etapas de carregamento.

As outras duas rotinas para cálculo da energia acumulada e localização do tempo correspondente a um determinado percentual de energia do sinal, são derivações da rotina principal.

No caso da energia acumulada, a rotina foi modificada para calcular a relação da energia acumulada em cada posição do tempo com a energia acumulada total de todo o domínio pré-determinado. Já a rotina para localizar o valor do tempo correspondente a uma determinada energia, o comando *find* é acionado e localiza o tempo correspondente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir dos ensaios mecânico e de ultrassom realizados nas diferentes etapas de carregamento nas vigas de concreto armado são apresentados e discutidos neste capítulo.

5.1 RESULTADOS DE CARREGAMENTO MECÂNICO

A Tabela 5.1 apresenta os resultados de carregamento para momento experimental de fissuração e de ruptura nas vigas. Estes valores foram obtidos a partir de diagramas carga versus deslocamento ilustrado na Figura 5.1.

Tabela 5.1: Resultados de momento de fissuração e de ruptura das vigas.

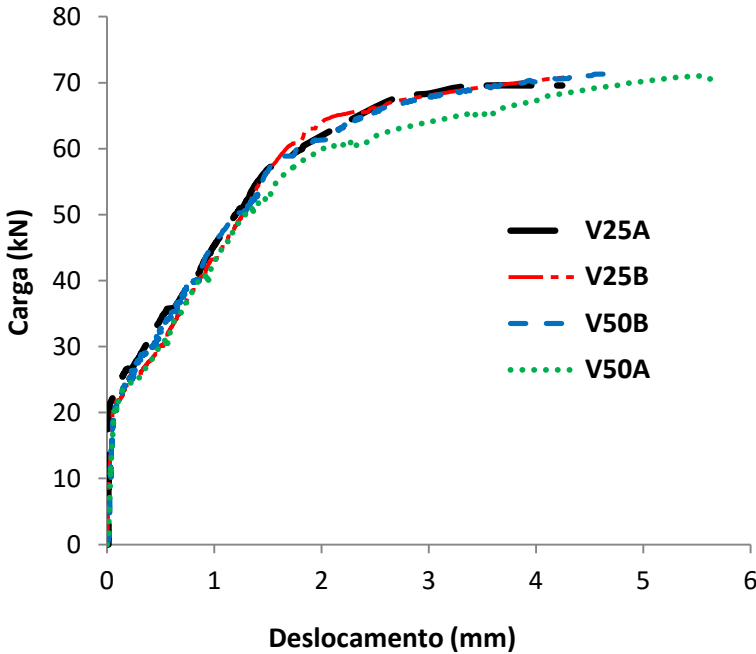
Viga	Desc.	Cobrimento (mm)	Fissuração		Ruptura	
			Momento (kN.m)	Carga (kN)	Momento (kN.m)	Carga (kN)
VA-I	V25A	25	3,24	21,60	10,44	69,58
VA-II	V25B	25	3,04	20,26	10,63	70,87
VB-I	V50A	50	3,20	21,37	10,66	71,05
VB-II	V50B	50	3,09	20,58	10,74	71,62

Observa-se que o momento experimental de fissuração em todas as vigas foi de aproximadamente 30% do momento correspondente a ruptura. Num comparativo, o momento de fissuração experimental representou entre 75% e 80% dos valores estimados.

Desta forma, mesmo com a diminuição, ainda assim, a relação de sensibilidade na detecção das primeiras fissuras pela energia do sinal, ficou correspondente entre as etapas de 20 kN e 30kN.

Em relação ao momento de ruptura, em todas as vigas o carregamento experimental superou o estimado, sendo que nas vigas V25B, V50A e V50B o último ensaio de ultrassom correspondente a etapa de 70 kN esteve antes da carga de ruptura, no entanto, pela proximidade, os resultados equivalentes a etapa de 70 kN foram adotados como correspondentes a carga de ruptura. No APÊNCIDE D são apresentadas imagens das vigas após ruptura.

Figura 5.1: Diagrama carga \times deslocamento das vigas.



5.2 FORMATO DAS ONDAS OBTIDAS PELO ULTRASSOM

Para ilustrar o comportamento dos sinais, são dados exemplos de formatos de onda escolhidos aleatoriamente entre as leituras, conforme as figuras a seguir.

Observa-se que mesmo com ganhos do sinal distintos, ou seja, ampliações das tensões no decorrer do tempo, é possível destacar que a janela de 5 milissegundos é muito superior ao intervalo de tempo suficiente para análise da maior parte do sinal, pois grande parte das amplitudes compreendem em limites de tempo inferiores.

Esta observação corrobora com as janelas determinadas pela maioria dos pesquisadores citados neste trabalho, onde geralmente, a análise do sinal compreende intervalos de tempo menores.

No caso das vigas analisadas, as amplitudes possuem valores próximos de zero em tempos inferiores a janela total, principalmente com a formação de fissuras decorrente do acréscimo de carregamento.

Logo, inicialmente pela visualização dos sinais a janela total de 5 ms estabelecida no equipamento cumpriu com seu objetivo de garantir que as amplitudes de tensão ficassem dentro do intervalo de análise.

Figura 5.2: Sinal ultrassônico V25A.

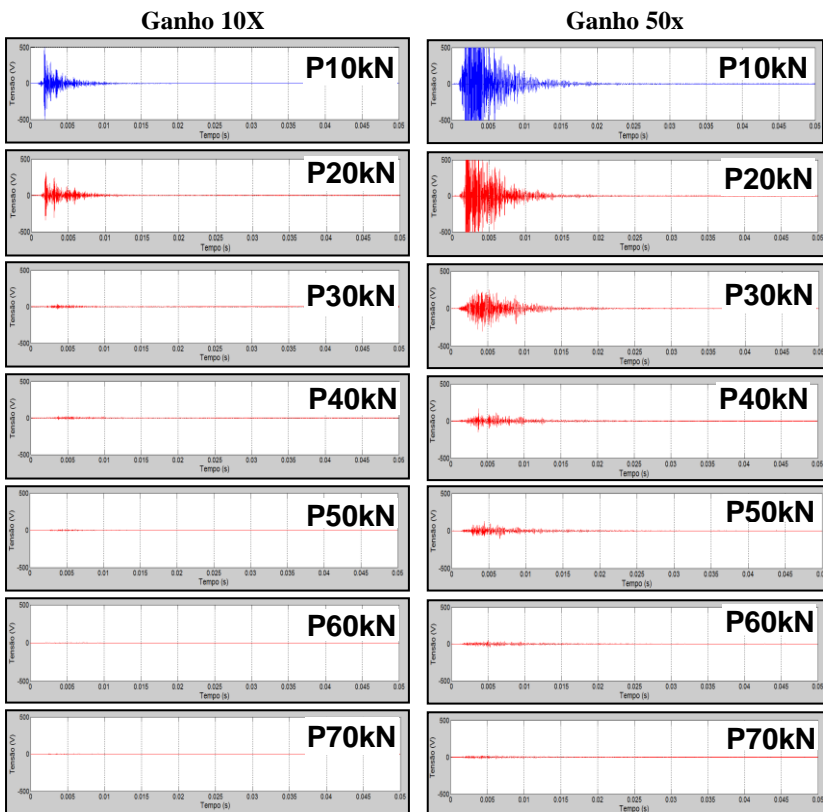
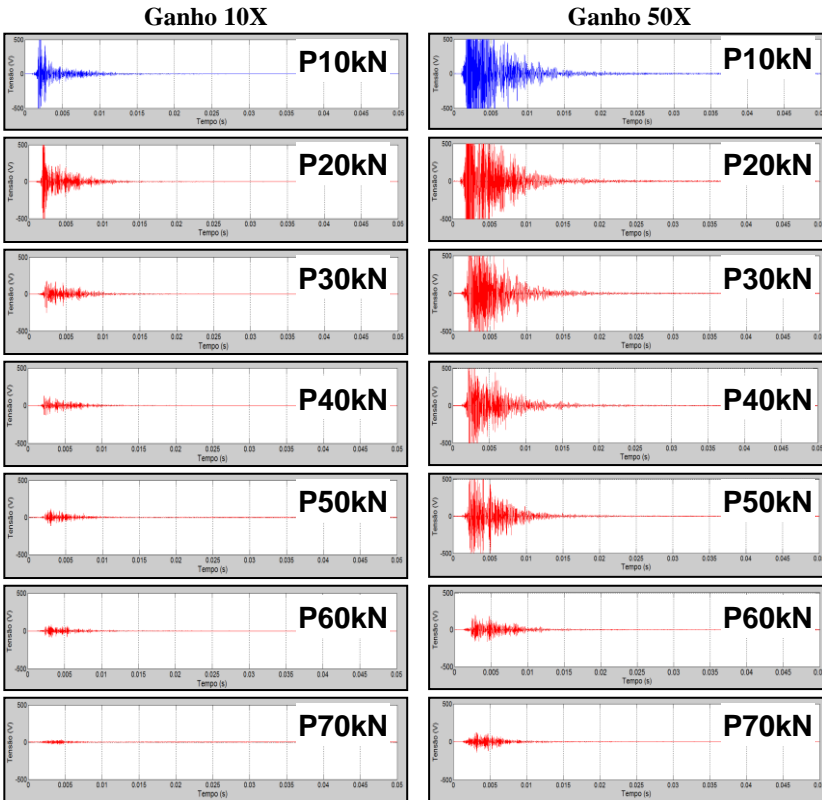


Figura 5.3: Sinal ultrassônico V50B.



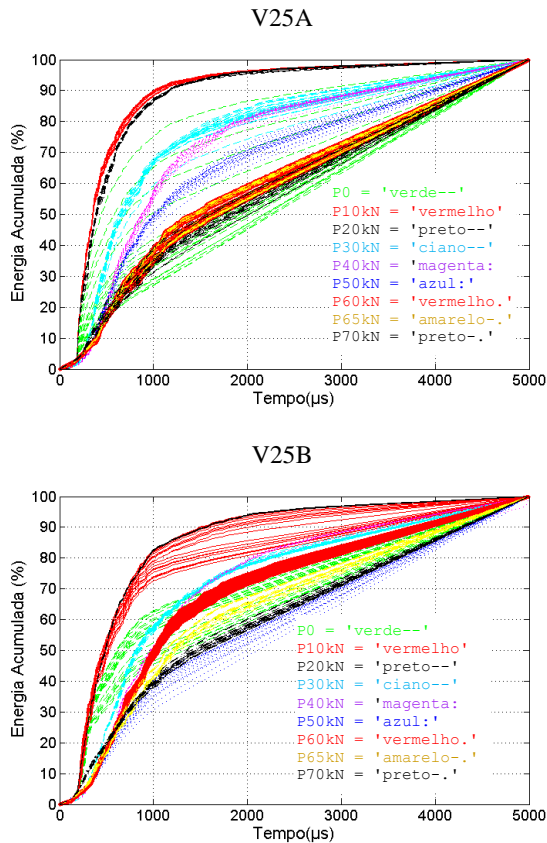
5.3 RESULTADOS DE JANELAS DE TEMPO PELA EQUAÇÃO 2.13b

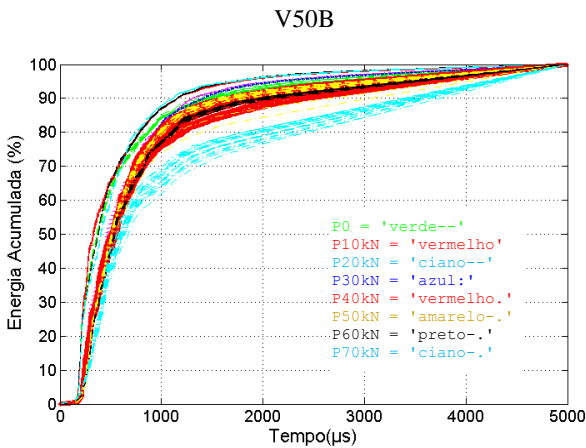
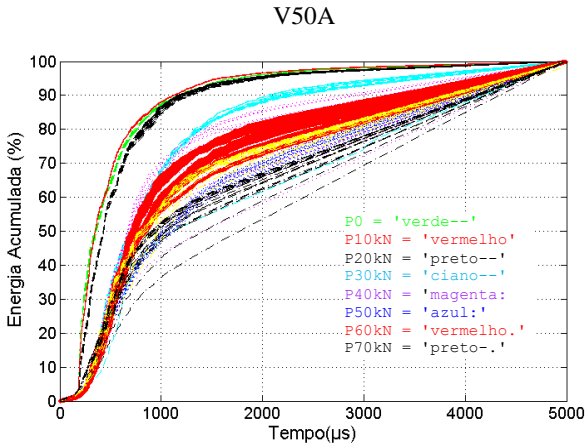
A Tabela 5.2 apresenta os tempos correspondentes à 25, 50, 75 e 90% da energia do sinal calculada pela Equação 2.13b com ganho do sinal de 10 vezes. Estes valores foram obtidos a partir das rotinas de energia acumulada do sinal. As curvas de energia acumulada são apresentadas na Figura 5.4.

Tabela 5.2: Tempos médios correspondentes a 25, 50, 75 e 90% da energia pela Eq. 2.13b e ganho-10x.

Cobrimento(mm)	25				50			
	t25 (μ s)	t50 (μ s)	t75 (μ s)	t90 (μ s)	t25 (μ s)	t50 (μ s)	t75 (μ s)	t90 (μ s)
P0	-	-	-	-	222	363	682	1339
P10	252	411	755	995	228	340	640	1144
P20	264	431	739	1335	256	418	972	1169
P30	463	751	1607	3434	381	624	-	1849
P40	569	943	1767	3425	388	659	1249	2729
P50	612	1039	2461	3980	418	775	1511	-
P60	615	1274	3246	3989	414	-	1825	2780
P70	664	1647	3321	4325	429	803	2105	3737

Figura 5.4: Energia acumulada - Equação 2.13b - ganho 10x.





Os resultados dos tempos correspondentes aos percentuais da energia do sinal descritos anteriormente passaram por uma análise de variância para verificar a influência da armadura na janela temporal, conforme a Tabela 5.3.

É possível observar que a distância dos transdutores em relação a armadura em função do cobrimento, apresentou diferenças significativas nos resultados da janelas correspondente a 25% da energia do sinal calculada pela equação 2.13b e com ganho de 10x.

Tabela 5.3: Análise de variância da influência da armadura nas janelas correspondentes aos percentuais de energia do sinal pela equação 2.13b e ganho de 10x.

Tempo correspondente ao percentual de energia	Fcrítico (95%)	Fcalculado
t25	4,60	4,78
t50	4,67	4,08
t75	4,75	2,53
t90	4,75	2,32

Um motivo para este resultado pode ser atrelado ao menor tempo médio de ruído nas diferentes etapas de carregamento referente às vigas com cobrimento de 50 mm conforme a Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Ruído médio do sinal (μ s) com ganho de 10X.

Carga (kN)		P0	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70
Cobrim. (mm)	25	100,65	96,81	93,49	142,93	151,43	197,82	159,11	166,25
	50	93,61	94,16	99,61	133,07	146,47	164,54	145,27	139,74

A Tabela 5.5 apresenta os tempos correspondentes à 25, 50, 75 e 90% da energia do sinal calculada pela Equação 2.13b com ganho do sinal de 50 vezes. Estes valores foram obtidos a partir das rotinas de energia acumulada do sinal. As curvas de energia acumulada são apresentadas na Figura 5.5.

Tabela 5.5: Tempos médios correspondentes à 25, 50, 75 e 90% da energia pela Eq. 2.13b e ganho-50X.

Cobramento (mm)	25				50			
	t25 (μ s)	t50 (μ s)	t75 (μ s)	t90 (μ s)	t25 (μ s)	t50 (μ s)	t75 (μ s)	t90 (μ s)
Carga (kN)								
P0	253	396	657	1264	259	421	704	1177
P10	283	439	725	1181	264	407	668	1065
P20	302	491	805	1326	279	453	736	1187
P30	454	690	1138	1890	385	586	959	1519
P40	519	803	1304	2168	392	594	986	1866
P50	494	789	1363	2200	378	500	738	1083
P60	526	889	1485	2758	423	622	970	1605
P70	426	811	1627	3206	399	596	946	1875

Da mesma forma, os resultados dos tempos correspondentes aos percentuais da energia do sinal com ganho de sinal de 50x passaram por uma análise de variância para verificar a influência da distância do transdutor a armadura na janela temporal, Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Análise de variância da influência da armadura nas janelas correspondentes aos percentuais de energia do sinal pela equação 2.13b e ganho de 50x.

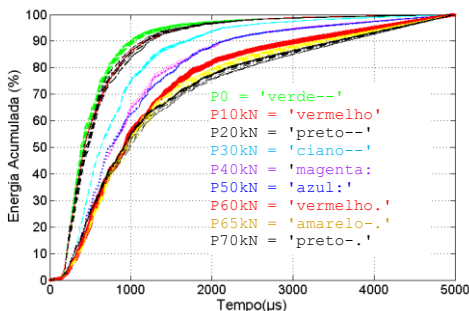
Tempo correspondente ao percentual de energia	Fcrítico (95%)	Fcalculado
t25	4,60	1,67
t50	4,60	3,56
t75	4,60	4,62
t90	4,60	4,07

Na análise com ganho de 50x, a distância dos transdutores apresentou influência nos valores da janela de tempo apenas no tempo correspondente a 75% da energia do sinal.

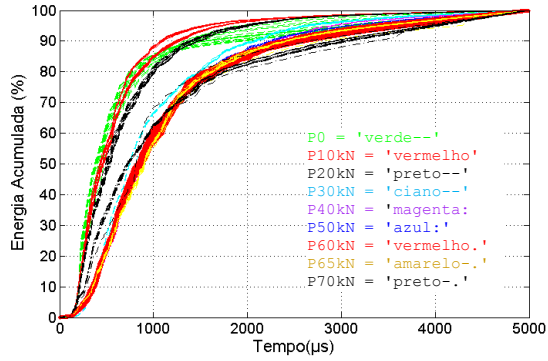
Com o crescimento das fissuras, houve uma maior atenuação na chegada das primeiras amplitudes. Este comportamento pode ser visualizado nos atrasos de tempo presentes na maioria dos resultados, ou seja, com o aumento do carregamento, observa-se um maior intervalo de tempo correspondente ao mesmo percentual da energia acumulada.

O atraso do tempo pode ser visualizado nas curvas de energia acumulada que apresentam inclinação inferior com o aumento da fissuração, com exceção da curva de energia acumulada relacionada ao P0 (sem carregamento) onde na maioria dos resultados dos tempos correspondentes foi maior ou próximo dos resultados de energia acumulada de P10 (10kN).

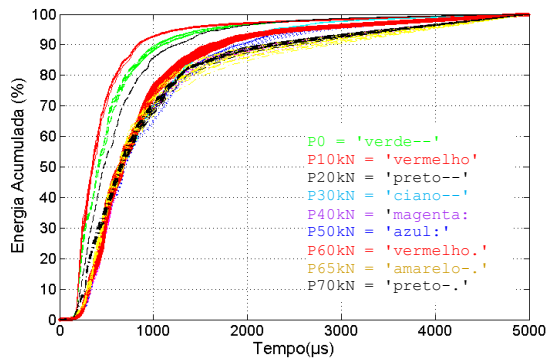
Figura 5.5: Energia acumulada - Equação 2.13b - ganho 50x.
V25A



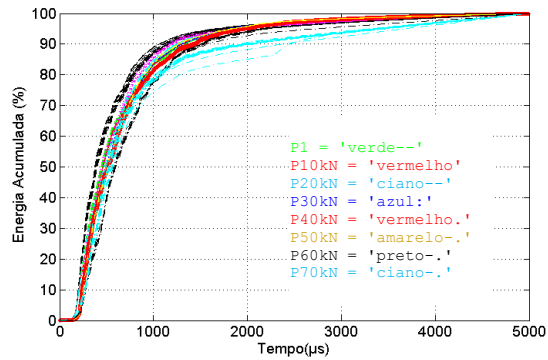
V25B



V50A



V50B



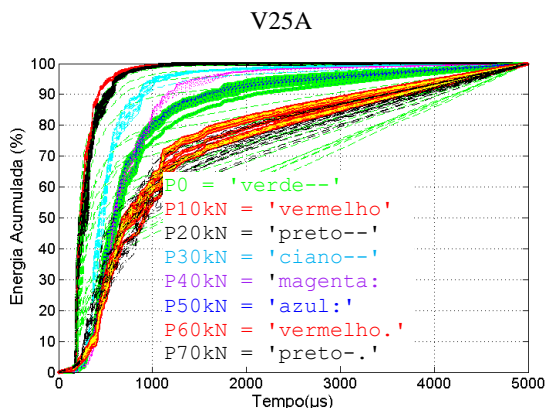
5.4 RESULTADOS DAS JANELAS DE TEMPO PELA EQUAÇÃO 2.13a

A Tabela 5.7 apresenta os tempos correspondentes à 25, 50, 75 e 90% da energia do sinal calculada pela Equação 2.13a com ganho do sinal de 10 vezes. Estes valores foram obtidos a partir das rotinas de energia acumulada do sinal. As curvas de energia acumulada são apresentadas na Figura 5.6.

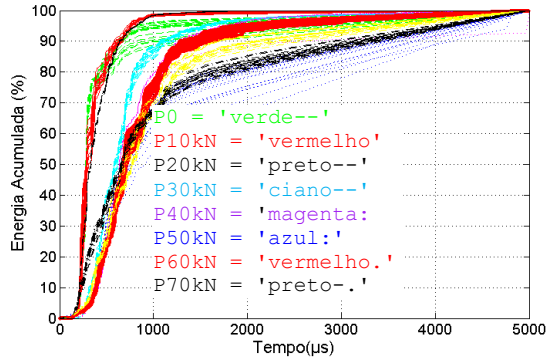
Tabela 5.7: Tempos médios correspondentes à 25, 50, 75 e 90% da energia pela Eq. 2.13a e ganho-10x.

Cobrimento (mm)	25				50			
	t25 (μ s)	t50 (μ s)	t75 (μ s)	t90 (μ s)	t25 (μ s)	t50 (μ s)	t75 (μ s)	t90 (μ s)
P0	261	427	346	803	196	206	284	427
P10	211	254	254	522	199	229	288	421
P20	218	283	412	565	204	256	396	550
P30	437	557	786	1131	317	420	611	873
P40	494	623	928	1281	323	416	595	888
P50	459	664	1247	1631	345	436	647	1073
P60	492	714	1259	1397	364	458	613	838
P70	395	746	1715	3206	340	461	640	1232

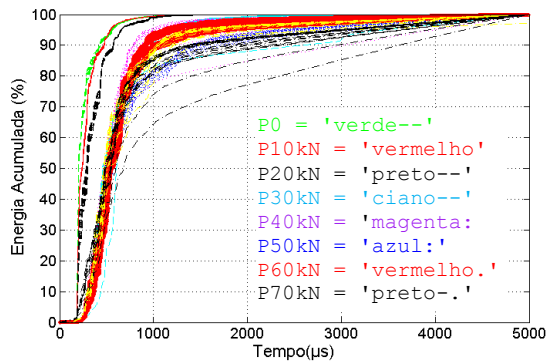
Figura 5.6: Energia acumulada - Equação 2.13a - ganho 10x.



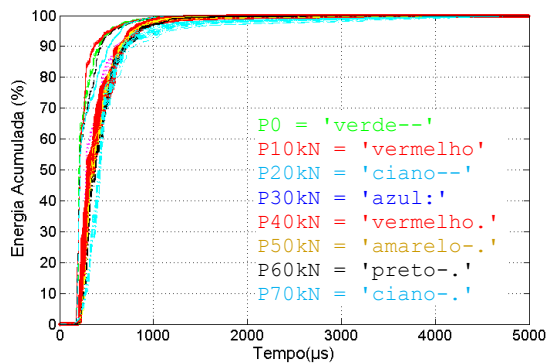
V25B



V50A



V50B



Os resultados dos tempos correspondentes aos percentuais da energia do sinal apresentado na Tabela anterior passaram por uma análise de variância para verificar a influência da armadura na janela temporal, conforme Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Análise de variância da influência da armadura nas janelas correspondentes aos percentuais de energia do sinal pela equação 2.13a e ganho de 10x.

Tempo correspondente ao percentual de energia	Fcrítico (95%)	Fcalculado
t25	4,60	2,87
t50	4,60	4,95
t75	4,60	3,51
t90	4,60	2,71

A análise de variância mostrou que a janela correspondente a 50% da energia do sinal calculada pela equação 2.13a e com ganho de 10x apresentou diferenças significativas entre os resultados das vigas de 25e 50 milímetros, ou seja, por esse modelo de cálculo uma maior distância dos transdutores a armadura resultou num acréscimo do intervalo de tempo correspondente para a mesma energia. Esta diferença implica a distorção do sinal representada pela atenuação na chegada das primeiras amplitudes da onda.

Dando continuidade na análise das janelas de tempo, a Tabela 5.9 apresenta os tempos correspondentes à 25, 50, 75 e 90% da energia do sinal calculada pela Equação 2.13a com ganho do sinal de 50 vezes. As curvas de energia acumulada são apresentadas na Figura 5.7.

Tabela 5.9: Tempos médios correspondentes à 25, 50, 75 e 90% da energia pela Eq. 2.13a e ganho-50x.

Cobrimento (mm)	25				50			
	t25 (µs)	t50 (µs)	t75 (µs)	t90 (µs)	t25 (µs)	t50 (µs)	t75 (µs)	t90 (µs)
P0	238	354	548	-	222	291	434	598
P10	266	395	582	922	229	311	424	581
P20	275	434	686	1037	242	346	498	639
P30	432	622	964	1490	346	420	592	834
P40	462	711	1069	1633	354	439	615	780
P50	468	700	1035	1692	339	427	594	826
P60	506	735	1156	1895	382	483	641	871
P70	388	646	1156	2137	301	406	583	774

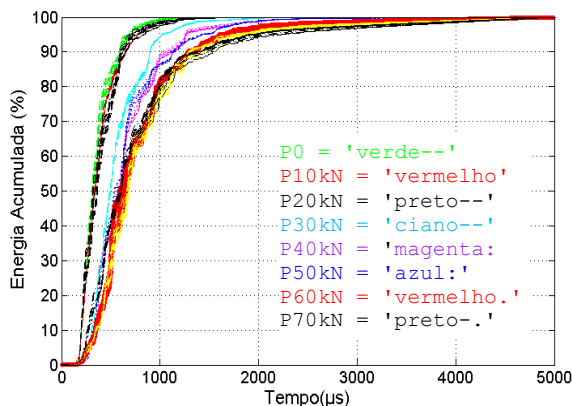
Os resultados dos tempos correspondentes aos percentuais da energia do sinal descritos na Tabela 5.9 passaram por uma análise de variância para verificar a influência da distância do transdutor a armadura na janela temporal, conforme a Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Análise de variância da influência da armadura nas janelas correspondentes aos percentuais de energia do sinal pela equação 2.13a e ganho de 50x.

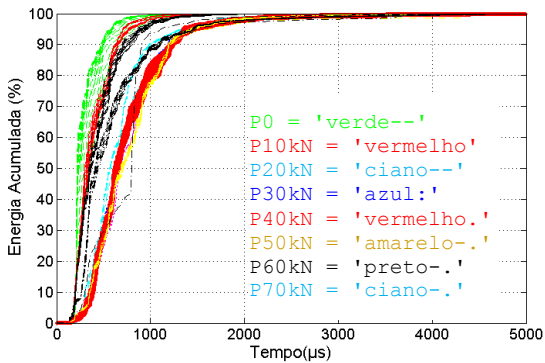
Tempo correspondente ao percentual de energia	Fcrítico (95%)	Fcalculado
t25	4,60	3,20
t50	4,60	9,52
t75	4,60	13,81
t90	4,67	25,35

A análise de variância dos resultados calculados pela Equação 2.13a, com ganho do sinal em 50 vezes, mostrou que as janelas correspondentes a 50%, 75% e 90% da energia do sinal apresentaram diferenças significativas entre os resultados das vigas de 25e 50 milímetros. Assim, a distorção das ondas fica mais evidente quando se utiliza o modelo da Equação 2.13a com ganho de 50 vezes, dado maior tempo relativo ao mesmo percentual de energia do sinal.

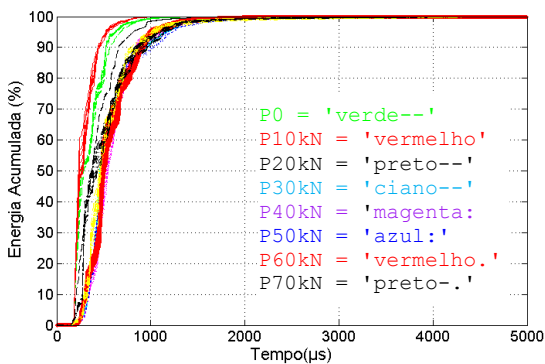
Figura 5.7: Energia acumulada - Equação 2.13a - ganho 50x.
V25A



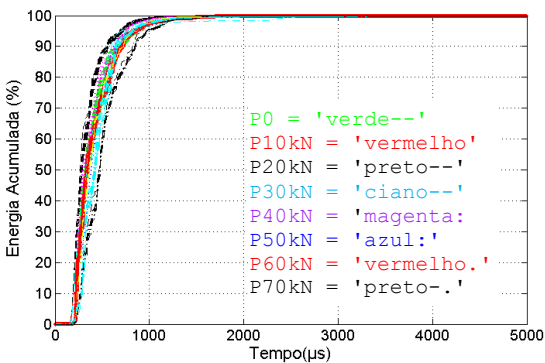
V25B



V50A



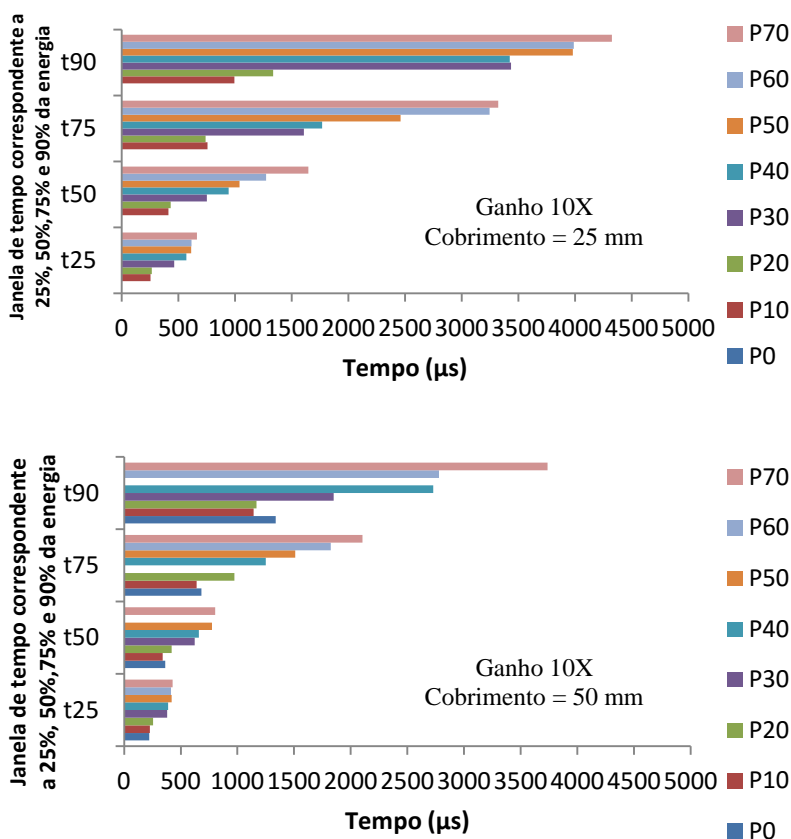
V50B



5.5 COMPARATIVO DOS RESULTADOS DAS JANELAS DE TEMPO ENTRE OS MODELOS DE CÁLCULO

Dos resultados das janelas de tempo correspondentes aos percentuais de energia acumulada do sinal calculados pelos dois modelos são apresentados de forma resumida nas Figuras 5.8 e 5.9 os limites de tempo correspondentes ao aumento do carregamento. Na Tabelas 5.11 são apresentados o resumo dos resultados e a seguir alguns tópicos de considerações são abordados.

Figura 5.8: Comparativo das janelas de tempo para Equação 2.13b.



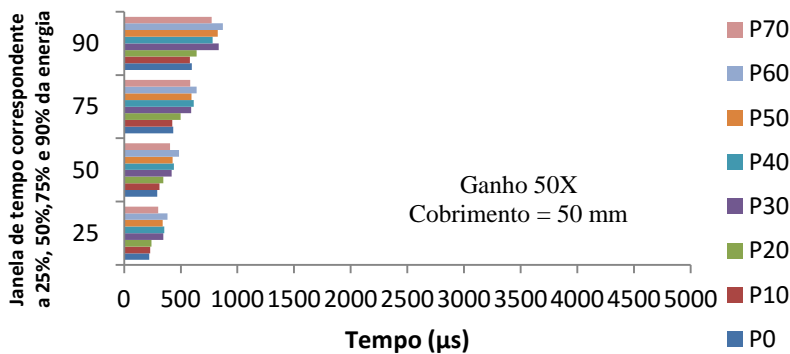
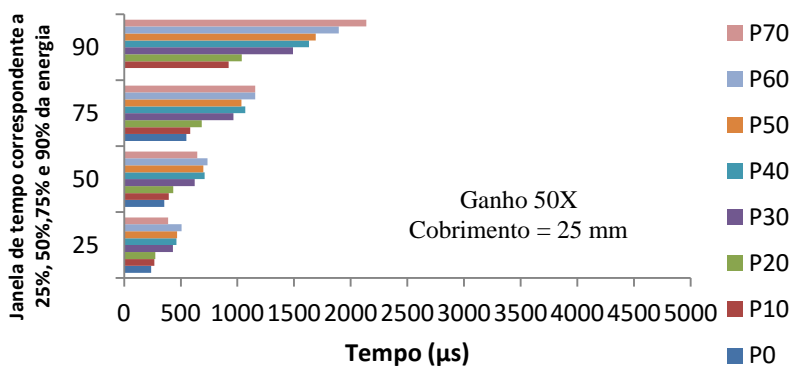
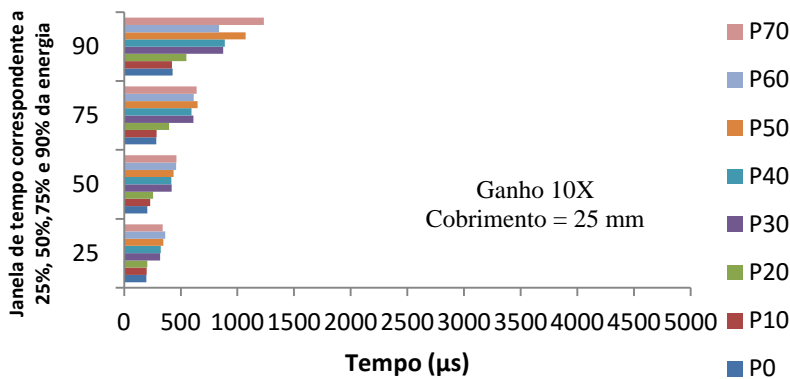


Tabela 5.11: Resumo das janelas de tempo correspondentes aos percentuais de energia.

Equação	Ganho	Tempo % da energia	Cobrimento (mm)	Janela correspondente ao Mr (relação entre barras verde P20 e lilás P30 das Figuras 5.8 e 5.9) (μs)
2.13b	10x	t25	25	264
			50	256
		t50	25	431
			50	418
		t75	25	739
			50	972
	t90	25	1335	
		50	1169	
	50x	t25	25	302
			50	279
		t50	25	491
			50	453
t75		25	805	
		50	736	
t90	25	1326		
	50	1187		
2.13a	10x	t25	25	218
			50	204
		t50	25	283
			50	256
		t75	25	412
			50	396
	t90	25	565	
		50	550	
	50x	t25	25	275
			50	242
		t50	25	434
			50	346
t75		25	686	
		50	498	
t90	25	1037		
	50	639		

Pela Equação 2.13b tanto para ganhos de 10x e 50x cerca de 50% da energia acumulada fica compreendida numa janela de tempo de 0 a aproximadamente 500 μs , isso valeu independente da distância dos transdutores as barras.

Para 90% da energia acumulada total a janela ficou confinada de 0 e aproximadamente 1300 μ s a 1400 μ s para cobertura de 25 mm, com uma pequena redução no tempo limite as vigas com cobertura de 50 mm.

Pela Equação 2.13a a janela de tempo representativa até 50% da energia também apresentaram valores inferiores a 500 μ s para ambos os ganhos. Com relação aos tempos correspondentes a 75% e 90%, este não tiveram valores maiores que 1400 μ s.

Assim, baseado nos resultados nesta discussão, uma janela foi definida para análise da energia, sendo chamada de energia total compreendida entre 0 e 1400 μ s. Por fim, destaca-se que este intervalo é similar ao adotado por alguns dos autores citados neste trabalho.

5.6 RESULTADOS DE ENERGIA TOTAL DO SINAL

A análise dos resultados do parâmetro da energia do sinal, obtidos pelo ensaio de ultrassom nas vigas, foi dividida em dois itens relacionados com cada modelo de cálculo.

5.6.1 Resultados de energia total do sinal pela equação 2.13b

As tabelas 5.12 e 5.13 apresentam os resultados da energia total do sinal calculada pela Equação 2.13b para as vigas com 25 mm de cobertura relacionada com o ganho de 10x.

Tabela 5.12: Energia total para viga 25A com ganho de 10x - Equação 2.13b.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	0,014	0,401	0,434	0,062	0,055	0,029	0,014	0,013
Desvio Padrão (V.s)	0,01	0,028	0,042	0,009	0,003	0,002	0,001	0,001
Coefficiente de variação (%)	43,60	6,91	9,75	15,26	5,46	8,67	7,80	9,23
Valor máximo (V.s)	0,03	0,47	0,48	0,08	0,06	0,03	0,02	0,01
Valor Mínimo (V.s)	0,01	0,37	0,32	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↑2700	↑8	↓86	↓11	↓47	↓52	↓7

Tabela 5.13: Energia total para viga 25B com ganho de 10x - Equação 2.13b.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	0,043	0,212	0,433	0,072	0,076	0,054	0,036	0,026
Desvio Padrão (V.s)	0,010	0,130	0,008	0,004	0,014	0,003	0,003	0,001
Coefficiente de variação (%)	22,46	61,11	1,77	5,99	17,88	6,01	7,25	5,61
Valor máximo (V.s)	0,056	0,451	0,444	0,079	0,092	0,060	0,040	0,030
Valor Mínimo (V.s)	0,029	0,091	0,423	0,055	0,059	0,050	0,031	0,024
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↑393	↑104	↓83	↑5	↓29	↓33	↓28

Nota-se a elevada atenuação da energia do sinal na etapa de carregamento correspondente ao momento de fissuração das vigas (entre 20kN e 30kN), com 86% e 83% , sendo que o percentual de atenuação diminui de maneira menos expressiva com os posteriores acréscimos de carregamento. As tabelas 5.14 e 5.15 apresentam os resultados de energia total do sinal para as vigas com 25 milímetros de cobrimento com ganho de 50x.

Tabela 5.14: Energia total para viga 25 A com ganho de 50x - Equação 2.13b.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	1,45	1,88	1,62	0,64	0,24	0,22	0,10	0,07
Desvio Padrão (V.s)	0,047	0,009	0,124	0,007	0,003	0,004	0,002	0,003
Coefficiente de variação (%)	3,22	0,49	7,65	1,11	1,25	1,62	1,66	4,60
Valor máximo (V.s)	1,49	1,90	1,75	0,65	0,25	0,23	0,11	0,07
Valor Mínimo (V.s)	1,31	1,86	1,36	0,63	0,24	0,22	0,10	0,06
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↑30	↑14	↓60	↓62	↓8	↓55	↓30

Tabela 5.15: Energia total para viga 25 B com ganho de 50x - Equação 2.13b.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	0,21	1,68	1,68	0,50	0,38	0,32	0,22	0,13
Desvio Padrão (V.s)	0,093	0,194	0,137	0,023	0,003	0,004	0,023	0,012
Coefficiente de variação (%)	43,35	11,60	8,16	4,72	0,86	1,10	10,40	8,62
Valor máximo (V.s)	0,31	1,94	1,85	0,56	0,39	0,33	0,24	0,18

Valor Mínimo (V.s)	0,08	1,40	1,34	0,46	0,37	0,32	0,17	0,13
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↑700	0	↓70	↓24	↓16	↓32	↓41

Mesmo apresentando sensibilidade na atenuação da energia total é possível observar que o sinal com ganho de 50x resultou numa energia com menor sensibilidade na etapa de carregamento correspondente ao momento de fissuração.

Da mesma forma, nas Tabelas 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19 são apresentados os resultados de energia do sinal para as vigas com 50 milímetros de comprimento.

Tabela 5.16: Energia total para viga 50A com ganho de 10x - Equação 2.13b.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	0,490	0,580	0,362	0,121	0,049	0,030	0,053	0,024
Desvio Padrão (V.s)	0,007	0,004	0,013	0,026	0,021	0,002	0,007	0,003
Coefficiente de variação (%)	1,36	0,76	3,70	21,77	42,47	7,64	13,28	13,55
Valor máximo (V.s)	0,498	0,589	0,380	0,143	0,081	0,032	0,060	0,026
Valor Mínimo (V.s)	0,470	0,570	0,342	0,021	0,015	0,025	0,036	0,014
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↑18	↓38	↓66	↓60	↓39	↑77	↓55

Tabela 5.17: Energia total para viga 50B com ganho de 10x - Equação 2.13b.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	0,513	0,225	0,577	0,291	0,157	0,156	0,131	0,052
Desvio Padrão (V.s)	0,024	0,048	0,005	0,005	0,017	0,026	0,006	0,005
Coefficiente de variação (%)	4,77	21,19	0,85	1,85	10,93	16,81	4,90	9,73
Valor máximo (V.s)	0,537	0,357	0,588	0,296	0,179	0,181	0,136	0,058
Valor Mínimo (V.s)	0,421	0,180	0,571	0,276	0,114	0,078	0,106	0,039
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↓56	↑156	↓50	↓46	↓1	↓16	↓60

Tabela 5.18: Energia total para viga 50A com ganho de 50x - Equação 2.13b.

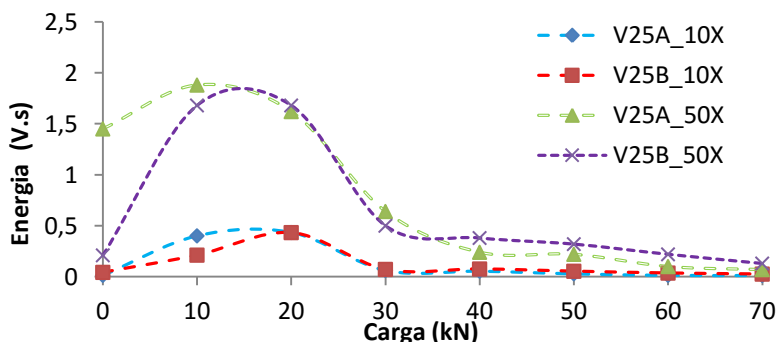
Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	1,16	0,98	1,74	0,68	-	0,32	0,33	0,17
Desvio Padrão (V.s)	0,08	0,05	0,00	0,00	-	0,02	0,01	0,01
Coeficiente de variação (%)	6,83	4,84	0,22	0,34	-	7,06	2,04	5,24
Valor máximo (V.s)	1,34	1,02	1,75	0,69	-	0,34	0,33	0,18
Valor Mínimo (V.s)	1,08	0,83	1,74	0,68	-	0,26	0,31	0,15
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↓15	↑77	↓61	-	↓53	↑3	↓49

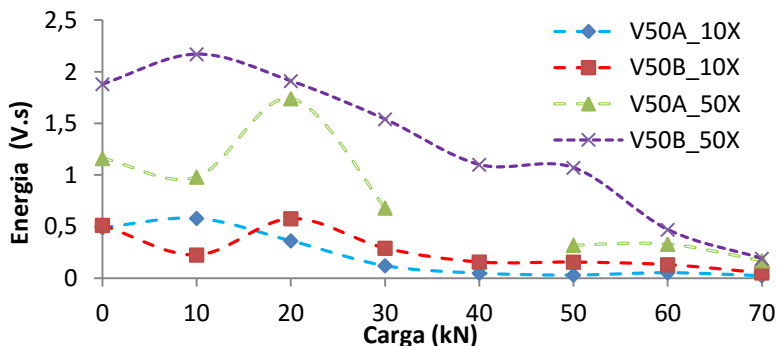
Tabela 5.19: Energia total para viga 50B com ganho de 50x - Equação 2.13b.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	1,88	2,17	1,91	1,54	1,10	1,07	0,47	0,19
Desvio Padrão (V.s)	0,104	0,007	0,030	0,007	0,014	0,003	0,030	0,012
Coeficiente de variação (%)	5,49	0,34	1,58	0,44	1,26	0,28	6,26	6,08
Valor máximo (V.s)	2,04	2,18	1,94	1,54	1,12	1,07	0,49	0,21
Valor Mínimo (V.s)	1,70	2,15	1,82	1,52	1,08	1,06	0,35	0,16
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↑15	↓12	↓20	↓33	↓3	↓56	↓60

Para facilitar a visualização do comportamento da energia total, na Figura 5.10 são apresentados os gráficos referentes às médias da energia total para as vigas.

Figura 5.10: Curvas de energia total calculadas pela Equação 2.13b.





É importante ressaltar que as vigas com mesmo cobrimento e mesmo ganho passaram por uma análise estatística de variância e todas não apresentaram diferenças significativas entre os resultados com 95% de confiança. O mesmo aconteceu comparando vigas de mesmo ganho e de cobrimento distintos. No entanto, as vigas com mesmo cobrimento e ganhos distintos apresentaram diferenças significativas. Logo, a distância dos transdutores a armadura não influenciaram os resultados, mas o ganho teve influência significativa.

5.6.2 Resultados de energia total do sinal pela equação 2.13a

As tabelas 5.20 a 5.23 apresentam os resultados da energia total do sinal calculada pela Equação 2.13a para as vigas com 25 mm de cobrimento relacionada com o ganho de 10x.

Tabela 5.20: Resultados de energia total para viga 25A com ganho de 10x - Equação 2.13a.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	-	51,69	52,31	0,66	0,44	0,12	0,03	0,03
Desvio Padrão (V.s)	-	6,26	9,41	0,16	0,05	0,02	0,00	0,01
Coefficiente de variação (%)	-	12,12	17,99	23,89	10,19	16,57	15,22	17,79
Valor máximo (V.s)	-	67,22	62,53	0,94	0,52	0,16	0,03	0,05
Valor Mínimo (V.s)	-	44,34	27,32	0,25	0,30	0,08	0,02	0,03
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	-	↑1	↓99	↓33	↓70	↑75	0

Tabela 5.21: Resultados de energia total para viga 25B com ganho de 10x -
Equação 2.13a.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	-	-	37,29	0,81	0,83	0,39	0,17	0,07
Desvio Padrão (V.s)	-	-	1,35	0,09	0,27	0,04	0,03	0,02
Coefficiente de variação (%)	-	-	3,61	10,82	32,52	10,48	17,50	28,47
Valor máximo (V.s)	-	-	39,57	0,92	1,14	0,48	0,21	0,13
Valor Mínimo (V.s)	-	-	35,64	0,45	0,49	0,34	0,12	0,04
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	-	-	↓98	↑2	↓53	↓56	↓59

Tabela 5.22: Resultados de energia total para viga 25A com ganho de 50x -
Equação 2.13a.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	419,60	604,83	465,58	62,33	9,20	7,50	1,48	0,61
Desvio Padrão (V.s)	16,58	3,47	47,44	1,49	0,23	0,30	0,04	0,06
Coefficiente de variação (%)	3,95	0,57	10,19	2,38	2,46	4,01	2,81	9,27
Valor máximo (V.s)	434,49	611,58	516,92	64,69	9,60	8,21	1,58	0,66
Valor Mínimo (V.s)	367,91	598,51	365,85	59,83	8,90	7,08	1,43	0,49
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↑44	↓77	↓87	↓85	↓81	↓80	↓59

Tabela 5.23: Resultados de energia total para viga 25B com ganho de 50x -
Equação 2.13a.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	99,42	485,64	477,02	37,35	20,27	14,52	6,27	2,70
Desvio Padrão (V.s)	154,80	80,11	54,47	3,12	0,40	0,33	1,36	0,64
Coefficiente de variação (%)	155,70	16,50	11,42	8,36	1,98	2,26	21,73	23,85
Valor máximo (V.s)	513,90	598,92	557,69	44,18	20,75	15,13	7,82	5,37
Valor Mínimo (V.s)	15,87	376,86	335,08	31,56	19,44	14,03	3,79	2,41
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↑44	↓2	↓92	↓85	↓81	↓80	↓59

Nota-se a elevada atenuação da energia do sinal na etapa de carregamento correspondente ao momento de fissuração das vigas (entre 20kN e 30kN), com 99% e 98% , para as ganhos de 10x. Esta sensibilidade diminuiu com o aumento do ganho para 50x.

Nas Tabelas 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27 são apresentados os resultados de energia do sinal para as vigas com 50 milímetros de comprimento.

Tabela 5.24: Resultados de energia total para viga 50A com ganho de 10x - Equação 2.13a.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	78,52	99,99	32,44	2,53	0,46	0,13	0,46	0,09
Desvio Padrão (V.s)	1,01	0,80	2,10	0,49	0,33	0,02	0,12	0,02
Coefficiente de variação (%)	1,28	0,80	6,48	19,50	72,08	15,13	26,43	24,64
Valor máximo (V.s)	79,37	101,22	35,29	3,33	1,03	0,16	0,60	0,11
Valor Mínimo (V.s)	75,27	98,24	29,18	1,91	0,04	0,10	0,22	0,03
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↑27	↓67	↓92	↓82	↓72	↑72	↓80

Tabela 5.25: Resultados de energia total para viga 50B com ganho de 10x - Equação 2.13a.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	17,46	87,17	92,67	17,60	5,53	5,27	3,48	0,51
Desvio Padrão (V.s)	7,73	6,46	1,86	0,70	1,14	1,41	0,26	0,10
Coefficiente de variação (%)	44,30	7,41	2,01	3,96	20,55	26,71	7,41	19,71
Valor máximo (V.s)	40,70	92,80	97,19	18,17	7,13	6,99	3,68	0,63
Valor Mínimo (V.s)	11,44	62,06	91,02	15,75	2,77	1,40	2,45	0,26
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↑400	↑6	↓81	↓69	↓5	↓34	↓85

Tabela 5.26: Resultados de energia total para viga 50A com ganho de 50x - Equação 2.13a.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	308,30	255,52	531,40	76,43	5,13	17,56	17,09	4,63
Desvio Padrão (V.s)	27,00	19,43	1,75	0,47	0,55	2,83	0,81	0,43

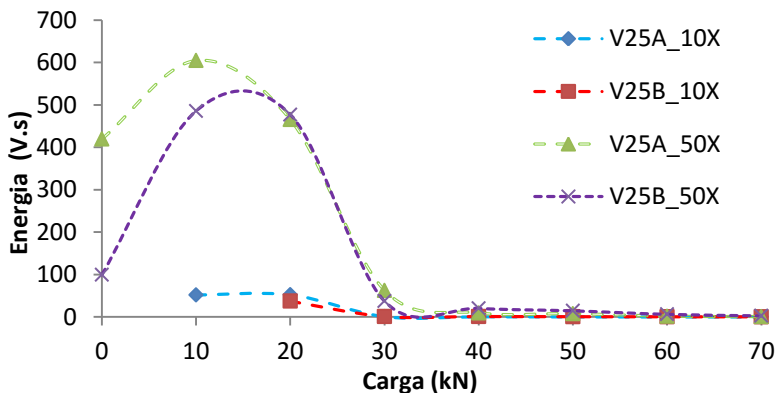
Coefficiente de variação (%)	8,76	7,60	0,33	0,61	10,63	16,11	4,72	9,38
Valor máximo (V.s)	370,48	272,24	533,70	77,32	6,09	20,07	18,18	5,21
Valor Mínimo (V.s)	282,54	198,53	527,71	75,78	3,78	11,09	14,76	3,60
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↓17	↑108	↓86	↓93	↑242	↑3	↓73

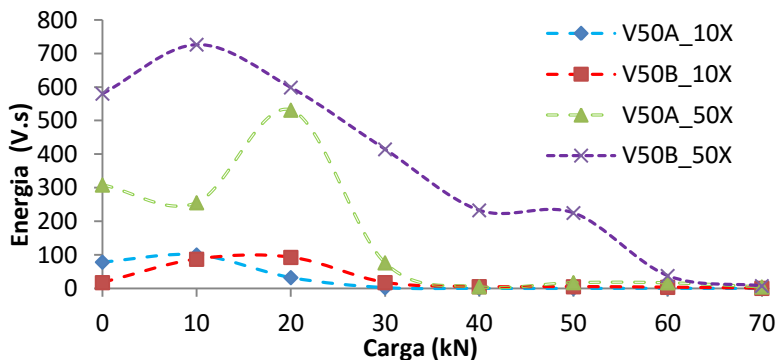
Tabela 5.27: Resultados de energia total para viga 50B com ganho de 50x - Equação 2.13a.

Carga (kN)	0	10	20	30	40	50	60	70
Média (V.s)	580,19	726,49	598,65	414,66	232,86	224,95	37,77	7,44
Desvio Padrão (V.s)	43,07	4,11	12,56	2,52	3,39	1,57	3,96	0,65
Coefficiente de variação (%)	7,42	0,57	2,10	0,61	1,46	0,70	10,47	8,79
Valor máximo (V.s)	648,55	732,43	610,61	417,90	238,56	227,47	40,38	9,03
Valor Mínimo (V.s)	509,88	714,91	558,52	410,29	227,75	222,49	22,20	5,82
Percentual em relação a carga anterior(%)	-	↑25	↓18	↓31	↓44	↓3	↑83	↓80

O comportamento da energia total é apresentado na Figura 5.11 com os gráficos referentes as médias da energia total para as vigas.

Figura 5.11: Curvas de energia total calculadas pela Equação 2.13a.





Analisando os resultados das vigas com 50 milímetros de cobrimento, de um modo geral a atenuação da energia total seguiu com magnitude similar até o fim do carregamento, diferentemente das vigas com 25 milímetros, onde esta atenuação não teve o mesmo decréscimo em percentagem.

5.6.3 Relação de decréscimos de velocidade de pulso e energia total

A seguir são apresentados nas Tabelas 5.28 a 5.31 os comparativos de sensibilidade entre as equações juntamente com a velocidade para todas as vigas. Posteriormente, estes resultados são discutidos em tópicos específicos.

Tabela 5.28: Sensibilidade da velocidade e da energia total para o momento de fissuração - V25A

Parâmetros	Ganho	Atenuação no momento de fissuração (%)	Coefficiente de variação (%)
Velocidade	10X	↓28	-
	50X	↓13	-
Energia Total	10X	2.13a	↓99
		2.13b	↓86
	50X	2.13a	↓87
		2.13b	↓60

Tabela 5.29: Sensibilidade da velocidade e da energia total para o momento de fissuração - V25B

Parâmetros	Ganho		Atenuação no momento de fissuração (%)	Coefficiente de variação (%)
Velocidade	10X		↓41	-
	50X		↓42	-
Energia Total	10X	2.13a	↓98	10,82
		2.13b	↓83	5,99
	50X	2.13a	↓92	8,36
		2.13b	↓70	4,72

Tabela 5.30: Sensibilidade da velocidade e da energia total para o momento de fissuração - V50A

Parâmetros	Ganho		Atenuação no momento de fissuração (%)	Coefficiente de variação (%)
Velocidade	10X		↓33	-
	50X		↓30	-
Energia Total	10X	2.13a	↓92	19,50
		2.13b	↓66	21,77
	50X	2.13a	↓86	0,61
		2.13b	↓61	1,85

Tabela 5.31: Sensibilidade da velocidade e da energia total para o momento de fissuração - V50B

Parâmetros	Ganho		Atenuação no momento de fissuração (%)	Coefficiente de variação (%)
Velocidade	10X		↓17	-
	50X		↓18	-
Energia Total	10X	2.13a	↓81	3,96
		2.13b	↓50	0,34
	50X	2.13a	↓31	0,61
		2.13b	↓20	0,44

Dentre os resultados discutidos nos itens anteriores e os expressos pelas Tabelas de sensibilidade, é possível destacar as seguintes considerações:

- V25A: para o ganho de 10X a sensibilidade da Equação 2.13a foi 13% superior ao da Equação 2.13b, no entanto, o coeficiente de variação foi 8,63% maior. Para o ganho de 50X a sensibilidade da Equação 2.13a foi 27% superior ao da Equação 2.13b e o coeficiente de variação entre os resultados foi maior em torno de 1,35%;

- V25B: para o ganho de 10X a sensibilidade da Equação 2.13a foi 15% superior ao da Equação 2.13b, no entanto, o coeficiente de variação foi 4,83% maior. Para o ganho de 50X a sensibilidade da Equação 2.13a foi 22% superior ao da Equação 2.13b e o coeficiente de variação entre os resultados foi 3,64% maior para Equação 2.13a;
- V50A: para o ganho de 10X a sensibilidade da Equação 2.13a foi 26% superior ao da Equação 2.13b e o coeficiente de variação reduziu 2,27%. Para o ganho de 50X a sensibilidade da Equação 2.13a foi 25% superior ao da Equação 2.13b e o coeficiente de variação entre os resultados foi 1,24% menor em relação a Equação 2.13b;
- V50B: para o ganho de 10X a sensibilidade da Equação 2.13a foi de apenas 31% superior ao da Equação 2.13b e o coeficiente de variação foi 3,62% maior. Para o ganho de 50X a sensibilidade da Equação 2.13a foi 11% superior ao da Equação 2.13b e o coeficiente de variação entre os resultados foi 0,17% maior em relação a Equação 2.13b;
- Comparando a energia total do sinal com a velocidade de pulso, em todos os casos a energia apresentou sensibilidade superior ao da velocidade, independente do ganho do sinal e da distância dos transdutores as armaduras;
- Em ambos os modelos de equações houve uma menor sensibilidade de detecção das fissuras para as vigas com os transdutores mais distantes das armaduras, entretanto, segundo a análise estatística, essas diferenças não foram significativas com os resultados da energia total com transdutores acoplados mais próximos da armadura.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve como objetivo estudar o parâmetro da energia do sinal ultrassônico para detecção de fissuras, bem como compreender as características do equipamento relacionadas ao sistema de aquisição de dados e, posteriormente, utilização de programa computacional para análise dos resultados de energia obtidos pelos formatos da onda.

Para isso, uma pesquisa bibliográfica foi inicialmente realizada, com a finalidade de embasar os procedimentos operacionais e de análise dos formatos das ondas. Apesar da especificidade do assunto, alguns trabalhos internacionais foram consultados, e a partir deles, foi possível compreender questões relacionadas ao parâmetro da energia do sinal.

Baseado nestas pesquisas um programa experimental foi desenvolvido para aplicação do ensaio de ultrassom e posteriormente aquisição de formatos de ondas relacionados com as amostras estudadas. Após a aquisição, uma implementação de rotinas computacionais facilitaram os cálculos dos parâmetros da energia, dado o grande número de resultados. As conclusões e alguns comentários gerais sobre a pesquisa são apresentados.

- A subdivisão proposta neste trabalho de janelas de tempo em relação aos percentuais de energia acumulada permitiu verificar que o intervalo de tempo correspondente a energia de total (1400 μ s) foi similar aos trabalhos pesquisados por outros autores (1600 μ s), logo para elementos estruturais de concreto armado com características similares ao apresentado neste trabalho, é possível determinar o limite da janela entre 1400 μ s e 1600 μ s;
- Das equações propostas pela literatura, a que leva em consideração apenas o sinal retificado apresentou menor sensibilidade na detecção de fissuras, porém com menor variação dos resultados em torno da média, enquanto que a equação que eleva a amplitude ao quadrado mostra maior sensibilidade, mas coeficiente de variação superior.
- Em relação ao ganho do sinal, o ganho de 50x apresentou resultados menos sensíveis em relação ao ganho de 10x, porém com coeficientes de variação menores. Isso pode ser explicado pelo truncamento das amplitudes nas primeiras janelas que resulta numa menor variação em torno da média;

- Verificou-se que os dois cobrimentos testados, relacionados com a distância dos transdutores a armadura, não apresentaram diferenças significativas nos resultados da energia. Logo, outra sugestão para trabalhos futuros é testar mais relações de distância dos transdutores as barras a fim de comprovar esta tese.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o parâmetro da energia estudado por diversos autores e estudado neste trabalho, apresenta sensibilidade e potencial para uso na avaliação e detecção de fissuras em elementos de concreto das mais variadas dimensões.

Alguns possíveis fatores de influência nos dados ultrassônicos foram verificados e percebidos ao longo da aquisição e análise dos resultados, entre eles, o ganho do sinal, a presença da armadura, e principalmente os diferentes modos de quantificar o tamanho do sinal pelo parâmetro da energia propostos pela literatura, sendo que as rotinas desenvolvidas para a aquisição e cálculo da energia do sinal facilitaram a análise dos resultados e, conseqüentemente estarão disponíveis para trabalhos futuros nesta área.

Por fim, embora neste trabalho tenha havido um aprofundamento nas características anteriormente citadas, são necessárias mais pesquisas com o parâmetro da energia do sinal para tornar esse método de avaliação confiável e exequível.

Como sugestão para trabalhos futuros, torna-se necessário estudar quais características podem resultar em variações de sensibilidade do parâmetro de energia na detecção de fissuras, seja no processo de aquisição dos sinais ou devido a fatores externos de acoplamento e pressão nos transdutores.

Em relação ao comportamento dos sinais, propõe-se uma nova fase de análise (por espectro de frequências) comparando as equações utilizadas nesta pesquisa e verificando se a sensibilidade e a variação dos resultados que surgiram no domínio do tempo também estarão presentes no domínio da frequência.

REFERÊNCIAS

- Aggelis, D.G. & Philippidis, T.P., 2004. Ultrasonic wave dispersion and attenuation in fresh mortar. *NDT and E International*, 37, pp.617–631.
- Aggelis, D.G., Polyzos, D. & Philippidis, T.P., 2005. Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: Theoretical predictions vs. experimental results. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53, pp.857–883.
- Aggelis, D.G. & Shiotani, T., 2008. Effect of inhomogeneity parameters on wave propagation in cementitious material. *ACI Materials Journal*, 105(105), pp.187–193.
- Aggelis, D.G. & Shiotani, T., 2008. Surface wave dispersion in cement-based media: Inclusion size effect. *NDT and E International*, 41(5), pp.319–325.
- Akhras, N.M., 1998. Detecting freezing and thawing damage in concrete using signal energy. *Cement and Concrete Research*, 28(9), pp.1275–1280.
- Anugonda, P., Wiehn, J.S. & Turner, J. a., 2001. Diffusion of ultrasound in concrete. *Ultrasonics*, 39, pp.429–435.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro.
- _____. 2011. NBR 9775. Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- _____. 2015. NBR 12655. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro.
- _____. 2009. NBR NM 53. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro.
- _____. 1998. NBR NM 67. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro.
- Behnia, A., Chai, H.K. & Shiotani, T., 2014. Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission. *Construction and Building Materials*, 65, pp.282–302.

Bungey, J.H., Millard, S.G. & Grantham, M.G., 2006. Testing of concrete in structures 4th ed., 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon: Taylor & Francis e-Library.

Carelli, J. M., 2014. Análise do comportamento de ondas ultrassônicas em elementos de concreto e argamassa. Universidade Federal de Santa Catarina.

Castro, M.T. DE, 2013. Processos estocásticos e equações de difusão: uma abordagem via o formalismo de paul lévy para funções características. Universidade de Brasília.

Dousti, A. et al., 2013. Corrosion Assessment of Reinforced Concrete Deck in a Jetty Structure Damaged by Chloride Attack. Journal of Performance of Constructed Facilities, (October), p.251.

Ensminger, D. & Bond, L., 2012. Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications 3rd ed. T. & F. Group, ed., London: CRC Press.

Eren, Ö. & Marar, K., 2010. Effect of steel fibers on plastic shrinkage cracking of normal and high strength concretes. Materials Research, 13(2), pp.135–141.

Ferraro, C.C., 2003. Advanced Nondestructive Monitoring and Valuation of damage in concrete materials. University of Florida.

Fu, L.-S., 1982. Fundamental aspects in quantitative ultrasonic determination of fracture toughness: The scattering of a single ellipsoidal inhomogeneity, The Ohio State University Columbus, Ohio.

Garnier, V. et al., 2009. Caractérisation non destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores. Mécanique & Industries, 10(3-4), pp.299–303.

Garnier, V. et al., 1995. Setting time study of roller compacted concrete by spectral analysis of transmitted ultrasonic signals. NDT & E International, 28, pp.15–22.

Golis, M.J., 1992. Ultrasonic Testing Level III Study Guide. , p.118.

Hauwaert, A. Van, Delannay, F. & Thimus, J., 1999. Cracking Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Revealed by Means of Acoustic Emission and Ultrasonic Wave Propagation. Most, (96), pp.291–296.

Van Hauwaert, A., Thimus, J.-F. & Delannay, F., 1998. Use of ultrasonics to follow crack growth. Ultrasonics, 36, pp.209–217.

- Hellier, C.J., 2001. Handbook of nondestructive evaluation, McGraw Hill Professional.
- Hertlein, B.H., 2013. Stress wave testing of concrete: A 25-year review and a peek into the future. *Construction and Building Materials*, 38, pp.1240–1245.
- Jacobs, L. J., and Owino, J.O., 2000. Effect of Aggregate Size on Attenuation of Rayleigh Surface Waves in Cement-Based Materials. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(November), pp.1124–1130.
- Kepler, W.F., Bond, L.J. & Frangopol, D.M., 2000. Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography. Part II - application. *Construction and Building Materials*, 14(3), pp.147–156.
- Krautkrämer, J. & Krautkrämer, H., 1983. Attenuation of Ultrasonic Waves in Solids. In Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ed. *Ultrasonic Testing of Materials*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, pp. 107–118.
- Landis, E.N. & Baillon, L., 2002. Experiments to Relate Acoustic Emission Energy to Fracture Energy of Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(June), pp.698–702.
- Lathi, B.P., 2007. *Sinais e Sistemas Lineares* 2nd ed. G. G. Parma & A. P. Júnior, eds., Porto Alegre: Artmed® Editora S.A.
- Malhotra, V.M. & Carino, N.J., 2004. *Handbook on nondestructive testing of concrete* Second Edi. A. International, ed., CCR Press LLC.
- McClements, D.J., 2006. Ultrasonic Measurements in Particle Size Analysis. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, (September), p.8.
- Mix, P.E., 2005. *Introduction to nondestructive testing: a training guide* 2nd ed., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Moradi-marani, F. et al., 2014. Evaluating the damage in reinforced concrete slabs under bending test with the energy of ultrasonic waves. *Construction and Building Materials*, 73, pp.663–673.
- Naik, T.R., Malhotra, V.M. & Popovics, J.S., 2004. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. In *CRC handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC Press, pp. 169–189.
- Non Destructive Testing. Disponível em: <www.ndt.net>. Acesso em: 17/05/2015.

Non Destructive Technical Education. Disponível em: <www.nde-ed.org>. Acesso em: 15/06/2015.

Pelisser, F. et al., 2010. Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking. *Construction and Building Materials*, 24(11), pp.2171–2176.

Philippidis, T.P. & Aggelis, D.G., 2005. Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. *Ultrasonics*, 43(7), pp.584–595.

Robeyst, N., Grosse, C.U. & De Belie, N., 2009. Measuring the change in ultrasonic p-wave energy transmitted in fresh mortar with additives to monitor the setting. *Cement and Concrete Research*, 39, pp.868–875.

Rucka, M. & Wilde, K., 2013. Experimental study on ultrasonic monitoring of splitting failure in reinforced concrete. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 32, pp.372–383.

Santhanam, M., 2010. Ultrasonic Characterization of Damage in Concrete. *Tech Science Press*, 3(2), pp.111–125.

Sears, F. Zemanski, M. & Young H. D., 1984. v.2: *Ondas. Física*. 2 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.

Serway, R.A. & John W. Jewett, J., 2010. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physic* 8th ed., Belmont. USA: Mary Finch.

Sheng, T.K., 2000. *An Introduction to Ultrasonic Testing and Evaluation of Solid Media*,

Shiotani, T. & Aggelis, D.G., 2009. Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage. *Materials and Structures*, 42, pp.377–384.

Suaris, W. & Fernando, V., 1987. Ultrasonic Pulse Attenuation As a Measure of Damage Growth During Cyclic Loading of Concrete. *ACI Materials Journal*, 84(84), pp.185–193.

Timoshenko, S.. & Goodier, J., 1970. *Teoria da Elasticidade* 3rd ed. S. F. Villça, H. L. Soriano, & H. S. Souza, eds., Rio de Janeiro: McGraw-Hill. Editora Guanabara Dois.

Vidya Sagar, R. & Raghu Prasad, B.K., 2011. An experimental study on acoustic emission energy as a quantitative measure of size independent specific fracture energy of concrete beams. *Construction and Building Materials*, 25(5), pp.2349–2357.

Yaman, I. et al., 2001. Ultrasonic pulse velocity in concrete using direct and indirect transmission. *ACI Materials Journal*, 98(6), pp.450–457.

APÊNDICE A

```

function onda
tic

clear all
clc

dt=.5e-6;
t=0:dt:(9992)*dt;

filename='Pastal';
sheet=2;
xlrange='C1:NTJ6';
[num,txt,row]=xlsread(filename,sheet,xlrange,'basic');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
PONTO X %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
LEITURA 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
e11 = num(1,:);
for i=1:9992;
    e(i)=trapz(abs(e11(1:i)));
end
format long
e1 = e(1000)*dt;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% LEITURA 2 %
e12 = num(2,:);
for i=1:9992;
    e(i)=trapz(abs(e12(1:i)));
end
format long
e2 = e(1000)*dt;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% LEITURA 3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
e13 = num(3,:);
for i=1:9992;
    e(i)=trapz(abs(e13(1:i)));
end
format long
e3 = e(1000)*dt;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% LEITURA 4
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
e14 = num(4,:);
for i=1:9992;
    e(i)=trapz(abs(e14(1:i)));
end

```

```

format long
e4 = e(1000)*dt;
%%%%%%%%%% LEITURA 5
e15 = num(5,:);
for i=1:9992;
    e(i)=trapz(abs(e15(1:i)));
end
format long
e5 = e(1000)*dt;
%%%%%%%%%% LEITURA 6
e16 = num(6,:);
for i=1:9992;
    e(i)=trapz(abs(e16(1:i)));
end
format long
e6 = e(1000)*dt;
%%%%%%%%%%
a = [e1 e2 e3 e4 e5 e6];
m = mean(a); %Média de energia inicial das leituras
dp = std(a); %Desvio padrão
cv = 100*(dp/m);
Max = max(a);
Min = min(a);
%%%%%%%%%%
global vetor
vetor = [e1 e2 e3 e4 e5 e6 m dp cv Max Min];
v=vetor.'
%%%%%%%%%%
toc

end

Equação 2.13a
function onda
tic

clear all
clc

dt=.5e-6;

```

```
t=0:dt:(9992)*dt;
```

```
filename='Pastal';
```

```
sheet=2;
```

```
xlrange='C76:NTJ83';
```

```
[num,txt,row]=xlsread(filename,sheet,xlrange,'basic');
```

```
%%%%%%%%%% PONTO X
```

```
%%%%%%%%%% LEITURA 1
```

```
%%%%%%%%%%
```

```
e11 = num(1,:);
```

```
for i=1:9992;
```

```
    e(i)=trapz(e11(1:i).^2);
```

```
end
```

```
e1 = e(3200)*dt;
```

```
%%%%%%%%%% LEITURA 2
```

```
%%%%%%%%%%
```

```
e12 = num(2,:);
```

```
for i=1:9992;
```

```
    e(i)=trapz(e12(1:i).^2);
```

```
end
```

```
e2 = e(3200)*dt;
```

```
%%%%%%%%%% LEITURA 3
```

```
%%%%%%%%%%
```

```
e13 = num(3,:);
```

```
for i=1:9992;
```

```
    e(i)=trapz(e13(1:i).^2);
```

```
end
```

```
e3 = e(3200)*dt;
```

```
%%%%%%%%%% LEITURA 4
```

```
%%%%%%%%%%
```

```
e14 = num(4,:);
```

```
for i=1:9992;
```

```
    e(i)=trapz(e14(1:i).^2);
```

```
end
```

```
e4 = e(3200)*dt;
```

```
%%%%%%%%%% LEITURA 5
```

```
%%%%%%%%%%
```

```
e15 = num(5,:);
```

```
for i=1:9992;
```

```
    e(i)=trapz(e15(1:i).^2);
```

```
end
```

```
e5 = e(3200)*dt;
```

```
%%%%%%%%%% LEITURA 6
```

```
%%%%%%%%%%
```

```
e16 = num(6,:);
```

```
for i=1:9992;
```



```

    e(i)=trapz(e16(1:i).^2);
end
e6 = e(3200)*dt;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% LEITURA 7
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
e17 = num(7,:);
for i=1:9992;
    e(i)=trapz(e17(1:i).^2);
end
e7 = e(3200)*dt;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% LEITURA 8
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
e18 = num(8,:);
for i=1:9992;
    e(i)=trapz(e18(1:i).^2);
end
e8 = e(3200)*dt;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
a = [e1 e2 e3 e4 e5 e6 e7 e8];
m = mean(a); %Média de energia inicial das leituras
dp = std(a); %Desvio padrão
cv = 100*(dp/m);
Max = max(a);
Min = min(a);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
global vetor
vetor = [e1 e2 e3 e4 e5 e6 e7 e8 m dp cv Max Min];
v=vetor.'
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

toc

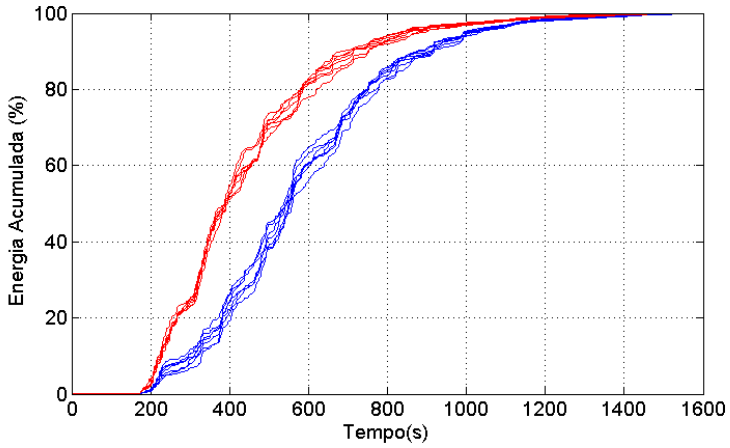
end

```

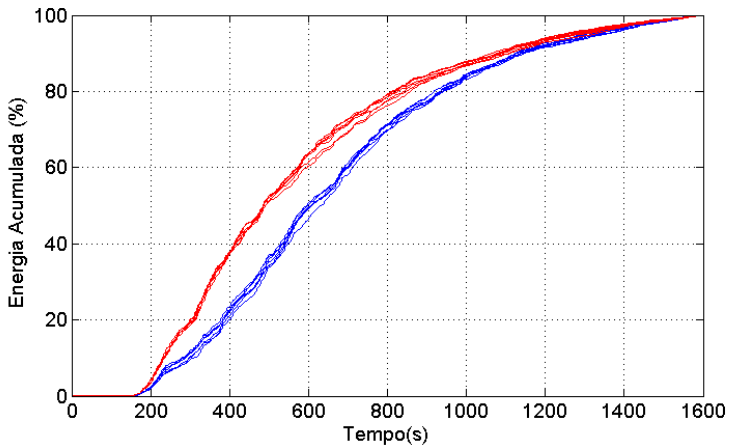
Fonte: desenvolvido pelo autor

APÊNDICE B

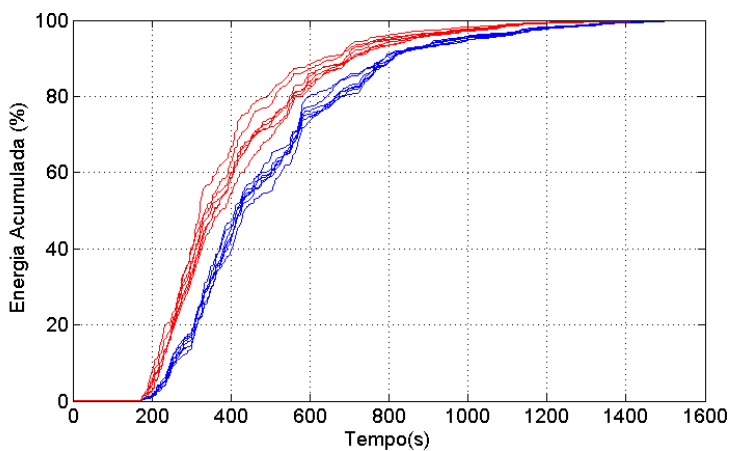
Ponto 14 - Equação 2.13a



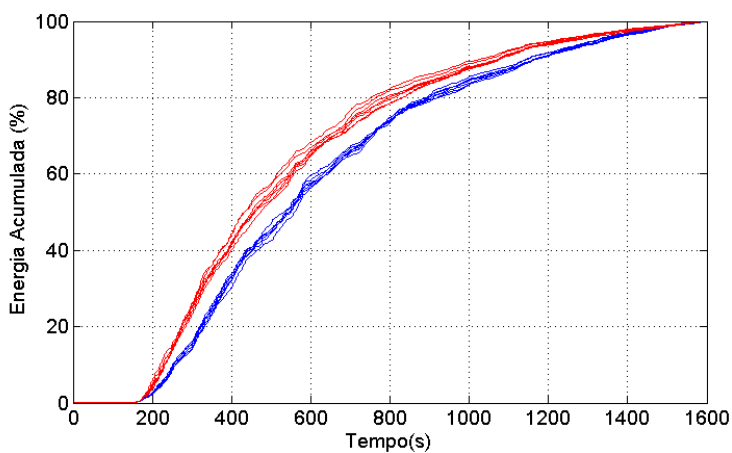
Ponto 14 - Equação 2.13b



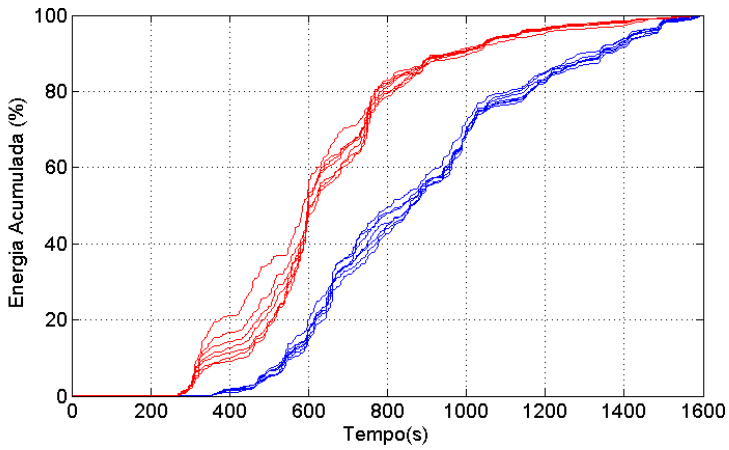
Ponto 12 - Equação 2.13a



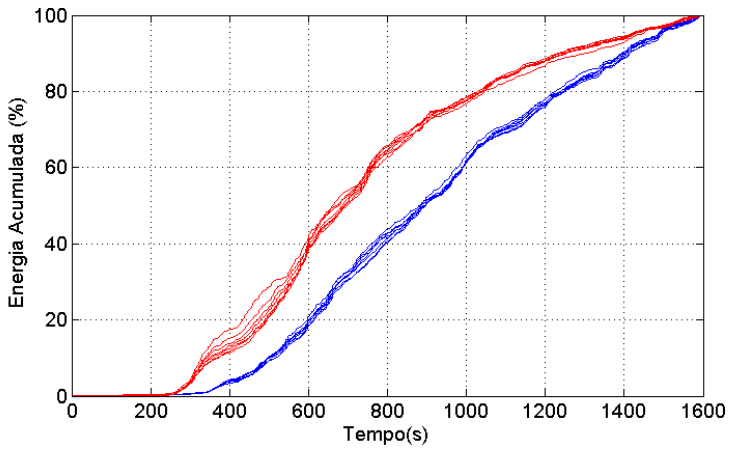
Ponto 12 - Equação 2.13b



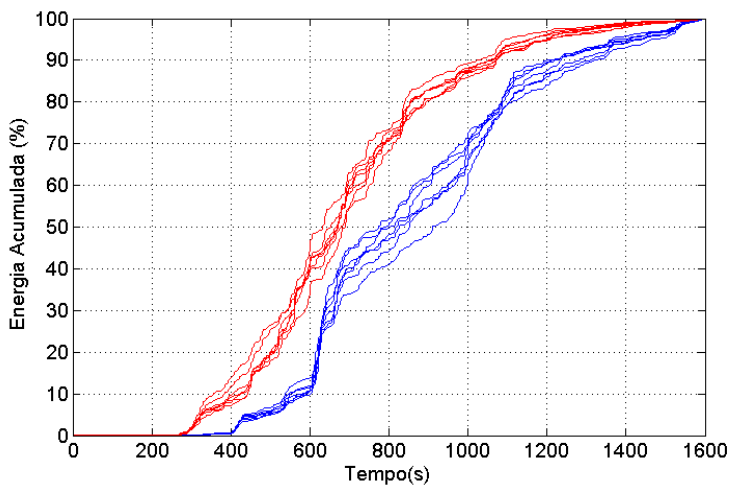
Ponto 25 - Equação 2.13a



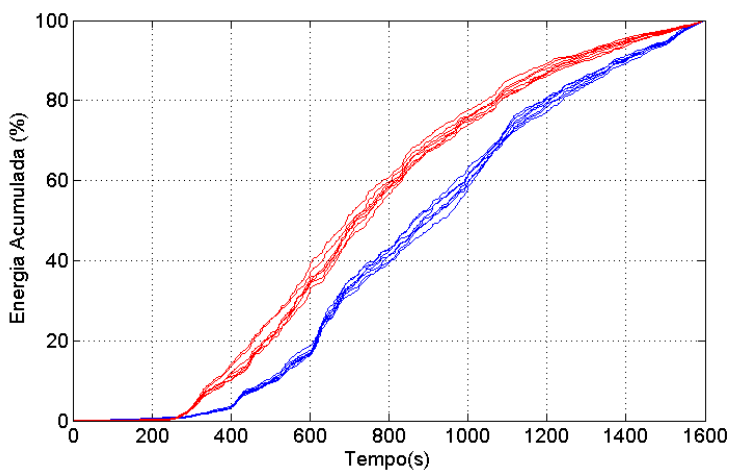
Ponto 25 - Equação 2.13b



Ponto 28 - Equação 2.13a



Ponto 28 - Equação 2.13b



APÊNDICE C

1º - Dados Gerais					
Características dos materiais					
Material	cimento	areia fina	areia média	brita	super
Massa específica (g/cm ³)	3,03	2,52	2,60	2,92	0,00
Umidade (%)		13,47	6,43	0,00	
Absorção (%)		0,00	0,00	0,00	
Características do traço					
1 : m = areia + brita				4,51	
a/c = água/cimento				0,52	
aditivo superplastificante (%)				0	
Traço unitário (1 : a : b)	1	1,07	1,07	2,37	
teor de ar incorporado (%)				0	
α_1 = teor de argamassa seca				46,62%	
α_2 = teor de argamassa seca úmida				52,22%	
Cálculo do consumo de cimento					
1/ γ_c (m ³ /kg)	0,330				
af/ γ_a (m ³ /kg)	0,425				
am/ γ_a (m ³ /kg)	0,412				
b/ γ_b (m ³ /kg)	0,812				
a/c	0,520				
Consumo (kg/m ³)	400,35				

2º - Correções						
Correções (absorção / umidade / água livre)						
Material	cimento	areia f	areiam	brita	água	super.
Quantidade (kg/m3)	400,35	428,37	428,37	948,83	208,18	0,00
Água livre (%)	-	-13,47	-6,43	0,00	-	-
Volume (m3)	132,13	169,99	164,76	324,94	208,18	0,00
Quantidade de água livre (kg/m3)	-	-57,70	-27,54	0,00	-	-
Corrigido (kg/m3)	400,35	486,08	455,92	948,83	164,91	0,00
Volume (dm3)	132,13	192,89	175,35	324,94	164,91	0,00

APÊNDICE D

A seguir são apresentadas as fissuras que surgiram nas vigas durante os ensaios aplicando nas diversas etapas de carregamento.

