

Jhulis Marina Carelli

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE ONDAS
ULTRASSÔNICAS EM ELEMENTOS FISSURADOS DE
CONCRETO E ARGAMASSA**

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

Florianópolis
2014

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

Carelli, Jhulis Marina

Análise do comportamento de ondas ultrassônicas em elementos fissurados de concreto e argamassa / Jhulis Marina Carelli ; orientador, Roberto Caldas de Andrade Pinto - Florianópolis, SC, 2014.

205 p.

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

Inclui referências

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

Jhulis Marina Carelli

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE ONDAS
ULTRASSÔNICAS EM ELEMENTOS FISSURADOS DE
CONCRETO E ARGAMASSA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC.

Local, 17 de março de 2014.

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

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D
Coordenador do PPGEC

Banca Examinadora:

Prof. Elton Bauer, Dr.
Universidade de Brasília - PECC/UnB

Prof.^a Angela do Valle, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina – ECV/UFSC

Prof. Ivo José Padaratz, Ph.D
Universidade Federal de Santa Catarina – PPGEC/UFSC

Aos meus pais, Pedro e Teresinha; ao meu irmão Jackson e ao meu namorado Ezequiel. Amo vocês, obrigada por tudo!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me guia e me protege ao longo dos caminhos que percorro.

Aos meus pais, Pedro (*in memoriam*) e Teresinha, pelo exemplo de honestidade, por tantas oportunidades oriundas do esforço deles, pelo cuidado, amor e pela vida que me deram. Pai, espero que esteja orgulhoso e feliz, pois essa conquista também é sua!

Ao meu irmão Jackson, pelo apoio de sempre, em especial nos primeiros meses em que estive fora de casa, quando me deu força para não desanimar. Agradeço pelo exemplo que sempre foi para mim, tanto pessoal quanto profissionalmente.

Ao meu namorado Ezequiel, pela paciência e compreensão nestes quase dois anos de espera; pela ajuda em absolutamente todos os momentos, que vão desde o auxílio no processamento dos dados até os conselhos e o ombro amigo quando precisei desabafar. Obrigada por ser essa pessoa maravilhosa, que não mede esforços pra me ver feliz. Te amo!

Ao meu orientador, professor Roberto Pinto, pela serenidade, pelas sugestões, pelo incentivo e pela dedicação demonstrada em cada etapa do estudo, desde a definição do tema até as correções finais. O admiro muito por ser esta pessoa tão agradável e um profissional exemplar. Obrigada por tudo!

Aos professores Ivo Padaratz e Ângela do Valle, pelas valiosas contribuições dadas no exame de qualificação realizado. Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC que contribuíram para minha formação acadêmica.

Agradeço também aos colegas e amigos que fiz aqui. Ao pessoal da salinha (GRUPEX, GPEND, GAP), Lourenço, Francisco e Ana, pela companhia diária e pelos momentos de descontração. Às minhas doutorandas prediletas, Elisabeth, Mariana e Flávia, pela amizade e pela alegria de sempre. Em especial aos amigos que permitiram que os ensaios laboratoriais se tornassem uma tarefa menos árdua e muito mais divertida, Paulo Junges e Gustavo Savaris, muitíssimo obrigada! Aos amigos Jeferson Rafael e Rovana, por mostrarem-se sempre presentes, auxiliando no que fosse possível, e por se tornarem tão especiais pra mim. Por fim, aos colegas que chegaram mais tarde, mas não menos importantes, Mateus, Augusto, Alverlando e Idilson, pelas risadas e pela companhia.

Aos funcionários que, de alguma maneira, auxiliaram na concretização deste trabalho, especialmente, às meninas da secretaria, Mari e Priscila, sempre muito dedicadas e simpáticas.

À Capes, pelo auxílio financeiro, muito importante para tornar possível a efetivação desta etapa de minha vida acadêmica.

A todos, que, de uma forma ou de outra, contribuíram para o sucesso desta pesquisa.

RESUMO

CARELLI, J. M. **Análise do comportamento de ondas ultrassônicas em elementos fissurados de concreto e argamassa.** 205 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

Nesta pesquisa realizou-se um estudo para a ampliação do uso da técnica de ultrassom, através da definição e aplicação de parâmetros obtidos pelo formato da onda que se propaga pelo material. Pesquisadores internacionais afirmam que parâmetros do formato da onda propagada são potencialmente mais sensíveis do que a análise convencional do ultrassom (via velocidade de pulso) para diversos tipos de danos avaliados. Através dos experimentos destes autores, foi possível definir parâmetros de análise obtidos pelo formato da onda de ultrassom: velocidade de grupo, amplitude máxima, energia (inicial, total e acumulada), magnitude e pico de frequência máxima, e frequência central. O programa experimental foi determinado para avaliar a eficiência destes parâmetros na investigação do estado de fissuração em estruturas de concreto e argamassa. Para isso, fez-se uma análise comparativa entre os resultados dos diversos parâmetros em placas de concreto e de argamassa, fissuradas e não fissuradas por retração plástica, e uma análise da evolução da fissuração ao longo de ensaio de flexão em vigas de concreto armado. Com base nos resultados obtidos, percebeu-se que nem todos os parâmetros mostraram-se adequados para as análises propostas. No entanto, alguns deles revelaram-se promissores na avaliação de fissuras, independentemente de suas características. Dentre os parâmetros que manifestaram sensibilidade, em geral, os resultados obtidos foram mais eficientes do que os de velocidade de pulso, confirmando a hipótese de que o formato da onda ultrassônica pode trazer respostas importantes quanto ao comportamento fissurado dos materiais.

Palavras-chave: Fissuração; Ensaio não destrutivos; Ultrassom; Formato de onda.

ABSTRACT

CARELLI, J. M. **Analysis of ultrasonic waves behavior in cracked concrete and mortar elements**. 205 f. Dissertation (Masters in Structures) - Program of Postgraduate in Civil Engineering - PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

This research, presents the possibility to enhance expanding ultrasound applications in concrete structures by applying using some waveform parameters other than the conventional ultrasound analysis (pulse velocity). According to international researchers, these waveform parameters are potentially more sensitive when damaged concrete is to be evaluated. Some of waveform parameters used by these researchers were: group velocity, maximum amplitude, (initial, total and cumulative) energy, magnitude and maximum frequency, and central frequency. The experimental program presented in this research was defined to evaluate the efficiency of these waveform parameters to evaluate the extent of cracking in concrete and mortar specimens. A comparative analysis was performed between several waveform parameters both in concrete and mortar slabs, subjected to plastic shrinkage cracking; and also in the development of flexural cracks in reinforced concrete beams. Based on the obtained results, it was noticed that not all the parameters were appropriate for the proposed analysis. However, some of them have revealed to be capable in the evaluation of cracking, regardless their characteristics. Among the parameters that presented overall sensibility, the results were more efficient than the pulse velocity, confirming the hypothesis that the ultrasonic waveform can bring important responses to the cracked behavior of the materials.

Keywords: Cracking; Non-destructive testing; Ultrasound; Waveform.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Exemplos de fissuras intrínsecas em uma estrutura hipotética	29
Figura 2.2: Fissuração plástica na superfície de pavimentos de concreto e de lajes contínuas.....	33
Figura 2.3: Nomograma para estimar a taxa de evaporação de uma superfície de concreto.....	35
Figura 2.4: Viga biapoiada e diagramas de esforços solicitantes	41
Figura 2.5: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio I)	42
Figura 2.6: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio II)....	43
Figura 2.7: Início do estágio de fissuração (fissuras verticais de flexão pura)	43
Figura 2.8: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio III) ..	44
Figura 2.9: Diagrama retangular	44
Figura 3.1: Caso uniaxial de tensões	48
Figura 3.2: Ondas longitudinais	49
Figura 3.3: Ondas transversais	50
Figura 3.4: Ondas de superfície.....	50
Figura 3.5: Esquema de funcionamento do ultrassom.....	52
Figura 3.6: Configuração para leituras de ultrassom - (a) direta - (b) semidireta - (c) indireta	54
Figura 3.7: Barras paralelas à propagação da onda de ultrassom	55
Figura 3.8: Valores dos coeficientes k obtidos no experimento e estimados pela Equação (3.10) em função da relação a/L	56
Figura 3.9: Relação entre a velocidade de pulso no concreto e no aço em função do diâmetro da barra em leituras transversais.....	57
Figura 3.10: Formato da onda de ultrassom após passagem pelo concreto, apresentando dispersão	59
Figura 3.11: Parâmetros selecionados obtidos pelo formato da onda de ultrassom no domínio do tempo - onda obtida através de leitura realizada na lateral de uma placa de concreto sã.....	60
Figura 3.12: Pacote de ondas e sua envoltória	61
Figura 3.13: Sinal no domínio do tempo ilustrando a amplitude pico-a-pico em diferentes amostra.....	62
Figura 3.14: Formato da onda e energia acumulada para argamassa sã	64
Figura 3.15: Parâmetros selecionados obtidos pelo formato da onda de ultrassom no domínio da frequência	65
Figura 3.16: Espectro de frequências ilustrando o pico de frequência em diferentes amostras.....	66
Figura 3.17: Diagrama esquemático da preparação do teste	67

Figura 3.18: Variação do coeficiente de dano para o concreto (traço 1:2:3;0,4) durante compressão uniaxial	69
Figura 3.19: Esquema dos locais de leitura de ultrassom	70
Figura 3.20: Média de três leituras nos pontos especificados em amostras submetidas ao congelamento-descongelamento em três níveis de danos: sem danos, 25% de redução de E_d e 50% de redução de E_d . .	71
Figura 3.21: Média de três leituras nos pontos especificados em amostras submetidas ao congelamento-descongelamento em três níveis de danos: sem danos, 25% de redução de E_d e 50% de redução de E_d . .	72
Figura 3.22: Posicionamentos utilizados para leituras de ultrassom.....	73
Figura 3.23: Resultados do ultrassom - a) Definição do caminho entre os transdutores; b) Tempo de chegada do pulso, amplitude máxima e energia total das ondas de ultrassom <i>versus</i> crescimento da fissura na posição 1	73
Figura 3.24: Carregamento, energia da onda ultrassônica e velocidade do pulso ultrassônico <i>versus</i> deflexão da viga	75
Figura 3.25: Confeção das vigas (dimensões em mm) - a) Geometria da viga; b) Fibras alinhadas com auxílio de pinças na parte central da amostra.....	76
Figura 3.26: Carregamento, energia e velocidade de pulso <i>versus</i> deflexão da viga - a) concreto sem reforço; b) concreto reforçado com 1% em volume de fibras distribuídas aleatoriamente; c) concreto reforçado com 10 camadas de 49 fibras.....	78
Figura 3.27: Velocidade de pulso <i>versus</i> porcentagem de inclusões de diferentes tamanhos	79
Figura 3.28: Forma da onda para argamassas com diferentes porcentagens de inclusão plástica (danos)	80
Figura 3.29: Energia total da onda <i>versus</i> porcentagem de inclusões de diferentes tamanhos	81
Figura 3.30: Velocidade (de pulso e de grupo) para diferentes porcentagens de inclusão na argamassa	82
Figura 3.31: Energia e amplitude máxima normalizadas para diferentes porcentagens de inclusão (danos)	82
Figura 3.32: Energia acumulada para diferentes porcentagens de inclusão	83
Figura 3.33: Espectro de frequências para diferentes porcentagens de inclusão (danos).....	84
Figura 3.34: Frequências centrais para diferentes porcentagens de inclusão (danos).....	84
Figura 4.1: Forma das placas	88

Figura 4.2: Túnel para secagem da placa a ser fissurada - a) esquema; b) ensaio	90
Figura 4.3: Placa de concreto fissurada por retração plástica com destaque para os comprimentos visíveis das fissuras	91
Figura 4.4: Placa de argamassa fissurada por retração plástica com destaque para os comprimentos visíveis das fissuras	92
Figura 4.5: Formas e armaduras das vigas	93
Figura 4.6: Ensaio de ultrassom - a) <i>Pundit Lab</i> em uso; b) formato da onda mostrada pelo aparelho.....	94
Figura 4.7: Disposição dos pontos de leitura do ultrassom	95
Figura 4.8: Detalhe da localização vertical dos transdutores (dimensões em centímetros)	96
Figura 4.9: Esquema de ensaio das vigas submetidas a esforços de flexão (dimensões em centímetros).....	97
Figura 4.10: Onda apresentando diversos picos de amplitude	100
Figura 5.1: Formato de onda obtida pelo ultrassom no ponto 17- a) Concreto não fissurado; b) Concreto fissurado	102
Figura 5.2: Formato de onda obtida pelo ultrassom no ponto 23 - a) Concreto não fissurado; b) Concreto fissurado	103
Figura 5.3: Formato de onda obtida pelo ultrassom no ponto 4 - a) Argamassa não fissurada; b) Argamassa fissurada	104
Figura 5.4: Espectro de frequências - a) Concreto não fissurado (17); b) Concreto fissurado (17); c) Concreto não fissurado (23); d) Concreto fissurado (23); e) Argamassa não fissurada (4); f) Argamassa fissurada (4).....	107
Figura 5.5: Energia acumulada - todas as curvas obtidas no ponto 24 da placa de concreto não fissurada.....	109
Figura 5.6: Energia acumulada nas placas de concreto (1-20).....	110
Figura 5.7: Energia acumulada nas placas de concreto (21-32).....	110
Figura 5.8: Energia acumulada nas placas de argamassa	111
Figura 5.9: Manifestação de fissuras ao longo do carregamento na viga 2 - a) Leitura 1 e 2; b) Leitura 3; c) Leitura 4; d) Leitura 5; e) Leitura 6; f) Leitura 7	113
Figura 5.10: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 2- Posição 1 - a) Leitura 1; b) Leitura 2; c) Leitura 3; d) Leitura 4; e) Leitura 5..	115
Figura 5.11: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 2- Posição 2 - a) Leitura 1; b) Leitura 2; c) Leitura 3; d) Leitura 4; e) Leitura 5..	116
Figura 5.12: Espectro de frequências - Intervalo de tempo - a) 0 a 1600 μ s; b) 0 a 500 μ s; c) t_{pulso} a 1600 μ s; d) t_{pulso} a 500 μ s.....	123
Figura 5.13: Energia acumulada na posição 1 - a) Viga 1; b)Viga 2; c) Viga 3.....	128

Figura 5.14: Energia acumulada na posição 2 - a) Viga 1; b) Viga 2; c) Viga 3.....	129
Figura 6.1: Comparação entre todos os parâmetros válidos nas placas de concreto fissurado e não fissurado (leituras de 1 a 20)	135
Figura 6.2: Comparação entre todos os parâmetros válidos nas placas de concreto fissurado e não fissurado (leituras de 21 a 32)	136
Figura 6.3: Comparação entre todos os parâmetros válidos nas placas de argamassa fissurada e não fissurada.....	137
Figura 6.4: Limites de tempo nas curvas de energia acumulada nas placas de concreto (1-20).....	140
Figura 6.5: Limites de tempo nas curvas de energia acumulada nas placas de concreto (21-32).....	141
Figura 6.6: Limites de tempo nas curvas de energia acumulada nas placas de argamassa	142
Figura 6.7: Velocidade de pulso nas três vigas - a) Posição 1; b) Posição 2	144
Figura 6.8: Velocidade de grupo nas três vigas - a) Posição 1; b) Posição 2	146
Figura 6.9: Energia inicial nas três vigas - a) Posição 1; b) Posição 2	147
Figura 6.10: Energia total nas três vigas - a) Posição 1; b) Posição 2.	148
Figura 6.11: Amplitude máxima nas três vigas - a) Posição 1; b) Posição 2	150
Figura 6.12: Parâmetros de frequência nas três vigas - t_{pulso} a 500 μs - a) Freq. máx. posição 1; b) Freq. máx. posição 2; c) Freq. central. posição 1; d) Freq. central posição 2.....	151
Figura 6.13: Magnitude da frequência máxima nas três vigas - 0 a 1600 μs - a) Posição 1; b) Posição 2.....	153
Figura 6.14: Magnitude da frequência máxima nas três vigas - 0 a 500 μs - a) Posição 1; b) Posição 2.....	154
Figura 6.15: Magnitude da frequência máxima nas três vigas - t_{pulso} a 1600 μs - a) Posição 1; b) Posição 2.....	155
Figura 6.16: Magnitude da frequência máxima nas três vigas - t_{pulso} a 500 μs - a) Posição 1; b) Posição 2.....	156
Figura 6.17: Comparação entre parâmetros válidos - Viga 1 - a) Posição 1; b) Posição 2.....	160
Figura 6.18: Comparação entre parâmetros válidos - Viga 2 - a) Posição 1; b) Posição 2.....	163
Figura 6.19: Comparação entre parâmetros válidos - Viga 3 - a) Posição 1; b) Posição 2.....	167

Figura 6.20: Comparação da energia acumulada em todas as vigas- a) Posição 1; b) Posição 2.....	172
Figura A.1: Manifestação de fissuras ao longo do carregamento na viga 1 - a) Leitura 1 e 2; b) Leitura 3; c) Leitura 5; d) Leitura 7.....	185
Figura A.2: Manifestação de fissuras ao longo do carregamento na viga 3 - a) Leitura 1 e 2; b) Leitura 3; c) Leitura 4; d) Leitura 5; e) Leitura 6	187
Figura A.3: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 1- Posição 1 - a) Leitura 1; b) Leitura 2; c) Leitura 3; d) Leitura 4; e) Leitura 5; f) Leitura 7	188
Figura A.4: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 1- Posição 2 - a) Leitura 1; b) Leitura 2; c) Leitura 3; d) Leitura 4; e) Leitura 5; f) Leitura 7	189
Figura A.5: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 3- Posição 1 - a) Leitura 1; b) Leitura 2; c) Leitura 3; d) Leitura 4; e) Leitura 5; f) Leitura 6; g) Leitura 7	190
Figura A.6: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 3- Posição 2 - a) Leitura 1; b) Leitura 2; c) Leitura 3; d) Leitura 4; e) Leitura 5; f) Leitura 6; g) Leitura 7	192
Figura A.7: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 2 - a) Leitura 6-Posição 1; b) Leitura 6-Posição 2; c) Leitura 7-Posição 1; d) Leitura 7-Posição 2.....	193
Figura A.8: Parâmetros de frequência nas três vigas - 0 a 1600 μ s - a) Pico de freq. máx. posição 1; b) Pico de freq. máx. posição 2; c) Freq. central. posição 1; d) Freq. central posição 2	203
Figura A.9: Parâmetros de frequência nas três vigas - 0 a 500 μ s - a) Pico de freq. máx. posição 1; b) Pico de freq. máx. posição 2; c) Freq. central. posição 1; d) Freq. central posição 2	204
Figura A.10: Parâmetros de frequência nas três vigas - t_{pulso} a 1600 μ s - a) Pico de freq. máx. posição 1; b) Pico de freq. máx. posição 2; c) Freq. central. posição 1; d) Freq. central posição 2	205

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação das fissuras intrínsecas	30
Tabela 3.1: Variação da velocidade de pulso para diferentes amostras submetidas à compressão uniaxial	68
Tabela 3.2: Variação da amplitude pico-a-pico para diferentes amostras submetidas à compressão uniaxial	68
Tabela 3.3: Resumo dos estudos realizados e dos resultados obtidos ...	85
Tabela 4.1: Velocidades do vento	90
Tabela 4.2: Cargas de leitura (kN)	98
Tabela 5.1: Velocidade de pulso e de grupo nas placas de concreto (leituras de 1 a 20).....	105
Tabela 5.2: Velocidade de pulso e de grupo nas placas de concreto (leituras de 21 a 32).....	105
Tabela 5.3: Velocidade de pulso e de grupo nas placas de argamassa	105
Tabela 5.4: Parâmetros de energia nas placas de concreto (1 a 20)	106
Tabela 5.5: Parâmetros de energia nas placas de concreto (21 a 32) ..	106
Tabela 5.6: Parâmetros de energia nas placas de argamassa.....	106
Tabela 5.7: Parâmetros de frequência nas placas de concreto (1 a 20)	108
Tabela 5.8: Parâmetros de frequência nas placas de concreto (21 a 32)	108
Tabela 5.9: Parâmetros de frequência nas placas de argamassa.....	108
Tabela 5.10: Velocidade de pulso e de grupo na viga 1	117
Tabela 5.11: Velocidade de pulso e de grupo na viga 2	118
Tabela 5.12: Velocidade de pulso e de grupo na viga 3	119
Tabela 5.13: Parâmetros de energia na viga 1	120
Tabela 5.14: Parâmetros de energia na viga 2.....	121
Tabela 5.15: Parâmetros de energia na viga 3.....	122
Tabela 5.16: Parâmetros de frequência na viga 1 - t_{pulso} a 500 μs	124
Tabela 5.17: Parâmetros de frequência na viga 2 - t_{pulso} a 500 μs	125
Tabela 5.18: Parâmetros de frequência na viga 3 - t_{pulso} a 500 μs	126
Tabela 6.1: Análise da variância em cada um dos parâmetros utilizados na placa de concreto e argamassa.....	131
Tabela 6.2: Análise da variância em cada um dos parâmetros utilizados na placa de concreto (leituras de 1 a 20)	137
Tabela 6.3: Análise da variância em cada um dos parâmetros utilizados na placa de concreto (leituras de 21 a 32)	138
Tabela 6.4: Análise da variância em cada um dos parâmetros utilizados na placa de argamassa	138
Tabela 6.5: Estado de fissuração das vigas - análise visual.....	158

Tabela 6.6: Estado de fissuração (análise visual) e resultados do ultrassom nas três leituras - Viga 1	160
Tabela 6.7: Estado de fissuração (análise visual) e resultados do ultrassom nas três leituras - Viga 2	164
Tabela 6.8: Estado de fissuração (análise visual) e resultados do ultrassom nas três leituras - Viga 3	168
Tabela A.1: Parâmetros de frequência na viga 1 - 0 a 1600 μ s	194
Tabela A.2: Parâmetros de frequência na viga 1 - 0 a 500 μ s	195
Tabela A.3: Parâmetros de frequência na viga 1 - t_{pulso} a 1600 μ s	196
Tabela A.4: Parâmetros de frequência na viga 2 - 0 a 1600 μ s	197
Tabela A.5: Parâmetros de frequência na viga 2 - 0 a 500 μ s	198
Tabela A.6: Parâmetros de frequência na viga 2 - t_{pulso} a 1600 μ s	199
Tabela A.7: Parâmetros de frequência na viga 3 - 0 a 1600 μ s	200
Tabela A.8: Parâmetros de frequência na viga 3 - 0 a 500 μ s	201
Tabela A.9: Parâmetros de frequência na viga 3 - t_{pulso} a 1600 μ s	202

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	JUSTIFICATIVA	26
1.2	OBJETIVO GERAL.....	27
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	27
2.	FISSURAS	29
2.1	FISSURAS POR RETRAÇÃO PLÁSTICA.....	32
2.1.1	Evaporação.....	34
2.1.2	Exsudação.....	36
2.1.3	Fatores que influenciam a retração plástica.....	37
2.1.3.1	Geometria da estrutura.....	37
2.1.3.2	Constituintes do material	38
2.1.3.3	Fatores ambientais	39
2.2	FISSURAS POR FLEXÃO	40
3.	PROPAGAÇÃO DE ONDAS	47
3.1	ULTRASSOM.....	47
3.1.1	Ensaio de ultrassom no concreto	51
3.1.1.1	Influência da temperatura de cura.....	54
3.1.1.2	Influência das armaduras no concreto.....	55
3.2	ANÁLISE DO FORMATO DA ONDA PROPAGADA PELO ULTRASSOM PARA AVALIAÇÃO DE DANOS	57
3.2.1	Parâmetros de análise no domínio do tempo.....	60
3.2.1.1	Velocidade de pulso.....	60
3.2.1.2	Velocidade de grupo	61
3.2.1.3	Amplitude pico-a-pico	62
3.2.1.4	Energia.....	63
3.2.1.5	Amplitude máxima	63
3.2.1.6	Energia acumulada.....	63
3.2.2	Parâmetros de análise no domínio da frequência	64
3.2.2.1	Pico de frequência.....	65
3.2.2.2	Frequência central.....	66
3.2.3	Estudos realizados usando parâmetros do formato da onda de ultrassom.....	66
3.2.3.1	Suaris e Fernando (1987).....	67
3.2.3.2	Selleck <i>et al.</i> (1998).....	70
3.2.3.3	Hauwaert, Thimus e Delannay (1998).....	72
3.2.3.4	Hauwaert, Delannay e Thimus (1999).....	75
3.2.3.5	Aggelis e Shiotani (2008).....	78
3.2.3.6	Shiotani e Aggelis (2009).....	81

3.2.4	Continuidade dos estudos relacionados ao tema.....	85
4.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	87
4.1	PLACAS DE CONCRETO	87
4.2	PLACAS DE ARGAMASSA	91
4.3	VIGAS DE CONCRETO ARMADO	92
4.4	ENSAIO DE ULTRASSOM	93
4.4.1	Placas	95
4.4.2	Vigas	96
4.4.3	Processamento dos dados e parâmetros utilizados	98
5.	RESULTADOS	101
5.1	PLACAS.....	101
5.1.1	Formato de onda.....	101
5.1.2	Velocidade de pulso e de grupo	105
5.1.3	Energia e amplitude máxima.....	106
5.1.4	Magnitude e frequência máximas e frequência central....	107
5.1.5	Energia acumulada.....	109
5.2	VIGAS.....	111
5.2.1	Formato de onda.....	114
5.2.2	Velocidade de pulso e de grupo	117
5.2.3	Energia e amplitude máxima.....	119
5.2.4	Magnitude e frequência máximas e frequência central....	122
5.2.5	Energia acumulada.....	126
6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	131
6.1	PLACAS.....	131
6.1.1	Parâmetros submetidos à análise de variância (ANOVA) 131	
6.1.1.1	Velocidade de pulso e de grupo.....	132
6.1.1.2	Energia e amplitude máxima	133
6.1.1.3	Magnitude da frequência máxima e frequência central	134
6.1.1.4	Comparação de eficiência entre os parâmetros.....	134
6.1.2	Energia acumulada.....	139
6.2	VIGAS.....	142
6.2.1	Velocidade de pulso e de grupo	143
6.2.2	Energia e amplitude máxima.....	146
6.2.3	Magnitude e frequência máximas e frequência central....	150
6.2.4	Comparação de eficiência entre os parâmetros	157
6.2.4.1	Viga 1	159
6.2.4.2	Viga 2	162
6.2.4.3	Viga 3	166
6.2.4.4	Considerações gerais sobre os parâmetros que mostraram sensibilidade à fissuração.....	170
6.2.5	Energia acumulada.....	171

7.	CONSIDERAÇÕES E COMENTÁRIOS FINAIS.....	173
7.1	FISSURAÇÃO POR RETRAÇÃO PLÁSTICA	173
7.2	FISSURAÇÃO POR FLEXÃO	174
7.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	175
7.4	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	176
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	179
	APÊNDICE A - RESULTADOS DAS VIGAS	185

1. INTRODUÇÃO

O concreto, além de versátil e durável, apresenta características de sustentabilidade, devido a pouca energia necessária para sua produção (se comparado a outros materiais, como o aço), adequada resistência e baixa manutenção quando as estruturas são bem projetadas e executadas. Estas são as propriedades que o mantém como líder para uso estrutural nas construções (ISAIA, 2011).

No entanto, a composição do concreto utilizado desde o seu surgimento já não é mais a mesma. Os estudos para o aprimoramento de técnicas que vão desde a seleção dos materiais constituintes até a elaboração dos projetos onde este é utilizado fizeram com que um novo cenário fosse criado. As estruturas estão cada vez mais esbeltas e de formatos variados, construídas em tempo recorde e com menor custo. Fatores que certamente são favoráveis à evolução, mas que trazem consigo aspectos preocupantes quanto à garantia de estabilidade estrutural e, assim, à segurança dos usuários.

A falta de capacitação de mão-de-obra, aliada aos erros e à negligência que muitas vezes acontecem nas fases de projeto e execução das obras, por parte de seus responsáveis, fazem com que apareçam problemas nas construções. As manifestações patológicas podem ser de diferentes causas e trazer consequências com graus variados de seriedade. A única maneira de reconhecer esses problemas, a fim de resolvê-los, é através de inspeções realizadas por profissionais capacitados.

Em meio às manifestações patológicas mais comuns estão as fissuras em geral. Para seu controle há a necessidade de utilização de técnicas capazes de avaliar seu desenvolvimento. Neste cenário, os ensaios não destrutivos são importantes aliados, pois não prejudicam a estrutura.

Dentre estes, o emprego do ultrassom, através da análise da velocidade de propagação do pulso no concreto para verificar vazios, fissuras e falhas em geral tem trazido resultados satisfatórios há alguns anos. Além da vantagem da obtenção da velocidade através do ensaio de ultrassom depender, em modo geral, apenas do comprimento do caminho percorrido pela onda, do tipo de transdutor e do acoplamento, há uma grande facilidade de utilização do equipamento.

No entanto, as fissuras de dimensões reduzidas, como as de retração plástica e de microfissuração por esforços que ultrapassam a capacidade resistente do material, nem sempre são visíveis através desta análise simples. Estudos têm mostrado que as respostas necessárias

podem estar no estudo do formato da onda de ultrassom propagada pelo material.

Assim, nesta pesquisa procura-se encontrar parâmetros de análise da onda do ultrassom que se propaga pelo concreto, armado ou não, a fim de avaliar a fissuração existente. Alguns destes parâmetros já utilizados pelos pesquisadores são: velocidade de grupo, amplitude máxima, energia, pico de frequência e frequência central.

Além disso, devido à heterogeneidade do concreto, e às influências que esta gera no formato da onda de ultrassom, alia-se ao presente estudo a análise de elementos de argamassa, onde a inexistência de agregado graúdo pode facilitar a interpretação dos resultados.

1.1 JUSTIFICATIVA

As fissuras podem ser consideradas como a manifestação patológica característica das estruturas de concreto, sendo o dano de ocorrência mais comum e que chama muito a atenção dos usuários. Isto se deve à sua fácil visualização, quando com aberturas maiores, e ao senso comum de que sua existência é sinônimo de problemas, mesmo que tecnicamente isto nem sempre seja verdade (SOUZA e RIPPER, 1998).

No entanto, o comprometimento da estrutura depende da causa, quantidade e magnitude das fissuras. E para definir qual é o estado de fissuração dos elementos é necessário algum tipo de verificação, seja ela visual ou utilizando métodos e equipamentos, tais como os diferentes métodos de análise não destrutiva ou ainda a retirada de testemunhos.

Dois tipos de fissuras comuns em estruturas de concreto são as causadas por retração plástica (que não causam problemas estruturais, apenas de durabilidade) e por esforços de flexão. Embora as fissuras de flexão possam ocorrer sem prejudicar o comportamento estrutural da peça, a sua identificação e possível caracterização do estágio em que se encontram podem auxiliar o profissional responsável a descobrir o grau de comprometimento do elemento.

Sendo assim, equipamentos ou métodos de ensaio que permitam identificar a fissuração são importantes aliados na inspeção de estruturas em geral. Desta maneira, neste estudo, busca-se utilizar o ultrassom em estruturas fissuradas por retração plástica e por esforços de flexão. Para isso, propõe-se utilizar além do cálculo da velocidade de pulso, princípio básico do emprego do ultrassom, outros parâmetros do pulso ultrassônico, tais como os mencionados no item anterior.

Estudos destes parâmetros vêm sendo desenvolvidos no âmbito internacional, e mostram sua eficiência, sendo, na maioria dos casos, muito mais sensíveis do que a velocidade de pulso do ultrassom. No entanto, nesta pesquisa pretende-se avaliá-los em fissuras de ocorrência prática, tais como as citadas anteriormente, a fim de encontrar uma nova possibilidade de análise com este equipamento, que pode ser de potencial uso e trazer melhores resultados.

1.2 OBJETIVO GERAL

Estudar os parâmetros associados à propagação da onda de ultrassom na avaliação de elementos fissurados de concreto e argamassa.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a.** Encontrar parâmetros capazes de tornar possível a análise da onda obtida pelo ultrassom ao passar pelos materiais.
- b.** Avaliar a eficiência destes parâmetros em placas de concreto e argamassa fissuradas por retração plástica.
- c.** Analisar a eficiência destes parâmetros em elementos de concreto armado submetidos à flexão.
- d.** Comparar os resultados obtidos pelos diferentes parâmetros e indicar os mais adequados para possíveis aplicações práticas.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esse trabalho está organizado em sete partes: introdução, fissuras, propagação de ondas, programa experimental, resultados, análise dos resultados e considerações finais.

Na introdução, são abordados aspectos característicos do concreto, as manifestações patológicas que o acometem e a aplicação do ultrassom na detecção das mesmas. É também apresentada a proposta e justificativa desta dissertação, bem como seus objetivos.

Os capítulos 2 e 3 fazem parte da revisão bibliográfica realizada. No capítulo 2, o assunto abordado está relacionado com as fissuras que serão avaliadas neste estudo, de retração plástica e de flexão. Já no capítulo 3, trata-se da propagação de ondas, com enfoque no funcionamento e utilização do ultrassom, citando apenas os dois fatores que poderiam influenciar nas leituras na presente pesquisa.

Ainda no capítulo 3, é apresentada a análise do formato da onda de ultrassom, tema do trabalho, trazendo experimentos e resultados obtidos pelos pesquisadores da área.

O quarto capítulo traz o programa experimental utilizado. São descritos os materiais e métodos empregados para a confecção dos elementos avaliados, bem como a sequência realizada para o ensaio com o ultrassom. Além da quantidade e localização das leituras, são definidos os parâmetros de análise do formato da onda de ultrassom. Os métodos estatísticos utilizados também são expostos neste capítulo.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos para cada um dos parâmetros avaliados nas diferentes situações de leitura realizadas. No capítulo 6 é feita a análise e discussão destes resultados.

Por fim, no capítulo 7 estão as conclusões extraídas da pesquisa realizada e recomendações para trabalhos futuros. Em seguida, tem-se as referências bibliográficas utilizadas e o apêndice.

2. FISSURAS

As fissuras são manifestações patológicas que aparecem nas estruturas de concreto sempre que ocorrem tensões de tração que superam a capacidade resistente do material. Podem ocorrer no estado fresco do concreto ou no endurecido. Sua configuração, posição na peça e a variação da abertura permitem, em muitos casos, diagnosticar a causa da sua ocorrência.

No entanto, um processo de fissuração pode, quando irregular, instalar-se em uma estrutura como consequência de diversas causas, intrínsecas ou não, e, para que se consiga identificar com precisão causa(s) e efeito(s), é necessário desenvolver análises consistentes (SOUZA e RIPPER, 1998). Estas análises baseiam-se no mapeamento do quadro fissuratório e no monitoramento da evolução das fissuras. Para isso, a abertura, extensão e profundidade das lesões são os parâmetros geométricos utilizados (ISAIA, 2011).

CEB (1992) apresenta exemplos de fissuras intrínsecas em uma estrutura (Figura 2.1), onde é possível perceber a grande variedade de tipos desta patologia. Na Tabela 2.1 cada uma delas é descrita e caracterizada, a fim possibilitar o melhor entendimento.

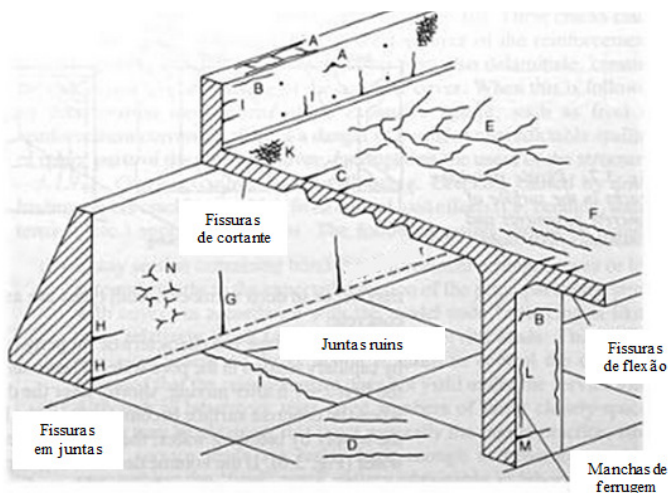


Figura 2.1: Exemplos de fissuras intrínsecas em uma estrutura hipotética

Fonte: CEB (1992)

Tabela 2.1: Classificação das fissuras intrínsecas

Tipo de fissuração	Posição na Figura 2.1	Subdivisão	Localização mais comum	Causas primárias (excluindo restrição)	Causas secundárias/ fatores	Prevenção (assumindo que uma modificação básica seja possível) - em todos os casos seria reduzir a restrição	Tempo de aparecimento
Assentamento plástico	A	Acima da armadura	Seções espessas	Excesso de exsudação	Condições de secagem rápida e antecipada	Reduzir a exsudação (inserção de ar) ou vibração	10 minutos a 3 horas
	B	Arqueamento	Topo de pilares				
	C	Mudança de espessura	Vale da laje nervurada				
Retração plástica	D	Diagonal	Lajes e pavimentos	Secagem rápida e antecipada	Baixa taxa de exsudação	Melhorar o processo de cura em idades iniciais	30 minutos a 6 horas
	E	Aleatória	Lajes de concreto armado				
	F	Acima da armadura	Lajes de concreto armado				

Fonte: CEB (1992)

Tabela 2.1: Classificação das fissuras intrínsecas (Continuação)

Tipo de fissuração	Posição na Figura 2.1	Subdivisão	Localização mais comum	Causas primárias (excluindo restrição)	Causas secundárias/ fatores	Prevenção (assumindo que uma modificação básica seja possível) - em todos os casos seria reduzir a restrição	Tempo de aparecimento
Contração termal antecipada	G	Restrição externa	Paredes finas	Excesso de geração de calor	Rápido resfriamento	Reduzir calor e/ou insolação	1 dia a 2 ou 3 semanas
	H	Restrição interna	Lajes finas	Excesso de gradiente de temperatura			
Retração por secagem	I	-	Lajes finas (e paredes)	Juntas ineficientes	Retração em excesso, cura ineficiente	Reduzir a água no concreto, melhorar a cura	Algumas semanas ou meses
Mapeamento	K	Concreto lançado	Lajes	Excesso de desempenho	Cura pobre	Melhorar cura e finalizações	1 a 7 dias, algumas vezes muito mais tardes
Corrosão da armadura	L	Natural	Vigas e pilares	Falta de cobrimento	Concreto de baixa qualidade	Eliminar causas listadas	Mais de 2 anos
	M	Cloreto de cálcio	Concreto pré-moldado	Excesso de cloreto de cálcio			

Fonte: CEB (1992)

Segundo ISAIA (2011), em muitos casos, a fissuração é decorrente de esforços associados a fenômenos de retração ou térmicos, sendo esta problemática na questão de estanqueidade e desempenho, e não na segurança estrutural. Já a fissuração resultante da incapacidade do material de suportar as tensões atuantes, em alguns casos, pode ser um indicativo de problemas sérios no projeto ou na execução.

A diferenciação entre estas duas categorias é feita fundamentalmente com base na atividade e progressão da abertura. Com o tempo, as primeiras tendem a aumentar sua abertura, mas não sua extensão. Já as fissuras estruturais mais graves tendem a se concentrar nas zonas de maior sollicitação e apresentar aberturas e extensões crescentes.

2.1 FISSURAS POR RETRAÇÃO PLÁSTICA

Esse fenômeno, comum em estruturas de concreto, ocorre na superfície do elemento, ao longo de seu período inicial, antes do endurecimento, segundo o CEB (1992). A abertura superficial característica deste tipo de fissuras está em torno de 2,0 a 3,0 mm, diminuindo à medida que se afasta da superfície. Seu comprimento e o espaçamento entre elas podem variar muito. Em geral, as fissuras são passivas, ou seja, não progridem com o tempo, no entanto, a ação conjunta de outros esforços causadores de fissuras pode facilitar o aumento da profundidade das mesmas.

De acordo com o CEB (1992), em lajes cuja armadura esteja muito próxima da superfície, as fissuras tendem a se localizar sobre as barras de armadura. Caso contrário, elas se distribuem conforme Figura 2.2. Percebe-se que nos casos de fissuração aleatória, as fissuras cortam-se quase sempre com ângulos aproximadamente retos. Isto porque, antes de aparecer uma fissura a superfície do concreto encontra-se submetida a trações uniformes; ao surgir a fissura, a tração que lhe é normal fica anulada, mas se mantém a que lhe é paralela, a qual pode originar uma nova fissura perpendicular à anterior (JOISEL, 1975).

Outra forma típica de fissuração em lajes por retração plástica é aquela formada por uma série de fissuras paralelas a aproximadamente 45° do canto da laje, espaçadas irregularmente e em distâncias que variam de 0,2 a 1,0 m (CEB, 1992).

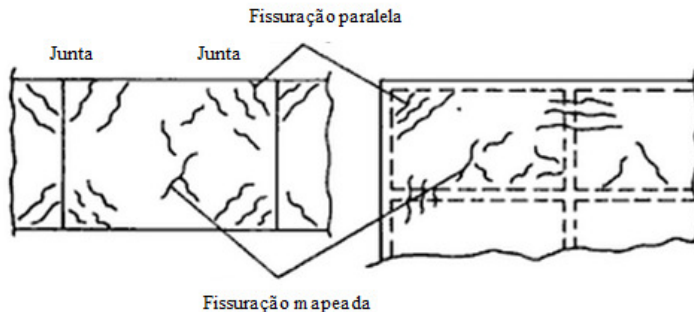


Figura 2.2: Fissuração plástica na superfície de pavimentos de concreto e de lajes contínuas

Fonte: CEB (1992)

Além da questão estética, a retração plástica pode causar fissuras que comprometam a função operacional e a durabilidade das estruturas de concreto, dependendo do seu fim específico e das condições às quais estão submetidas. Pavimentos rodoviários, pisos industriais e residenciais, tabuleiros de pontes e plataformas em geral são especialmente suscetíveis a esse tipo de fissuras devido à sua elevada superfície exposta.

A formação de fissuras devido à retração plástica ocorre pela velocidade de evaporação de água de amassamento do concreto ou pela demasiada absorção desta por parte dos agregados ou das formas, conforme indicado por Dal Molin (1988). No entanto, o efeito destes dois últimos pode ser facilmente eliminado por sua simples saturação.

Assim, após o estudo de vários autores, chegou-se ao consenso de que este tipo de retração ocorre quando a velocidade de evaporação da água de amassamento for maior que a velocidade de percolação da água até a superfície do concreto, por efeito da exsudação. Caso a retração não seja uniforme ou haja restrição, forças de tração são desenvolvidas, e, como nesta fase o concreto apresenta baixíssima resistência a este tipo de esforço, as fissuras podem aparecer.

Para que se entenda o funcionamento do processo de formação das fissuras por retração plástica, é necessário distinguir esses dois fenômenos que ocorrem com o concreto fresco: a evaporação e a exsudação.

2.1.1 Evaporação

O processo pelo qual o líquido é convertido em vapor ou gás é chamado de evaporação. De acordo com Uno (1998), ela acontece onde: a) a energia térmica é absorvida pelo líquido; b) a pressão sobre a superfície do líquido é menor que no próprio líquido, permitindo então que as moléculas ativas de água escapem como vapor. As condições climáticas que favorecem a sua ocorrência fazem com que haja a secagem da superfície do concreto fresco.

A fim de prevenir o aparecimento de fissuras em idades iniciais, muitos estudos foram realizados sobre este processo, resultando em algumas equações desenvolvidas para a estimativa da taxa de evaporação de água da superfície do concreto plástico (Menzel, 1954; Uno, 1998).

Além de expressões matemáticas para estimar a taxa de evaporação, um nomograma foi desenvolvido pelo ACI Committee 305 (1999) com este mesmo objetivo, baseado na equação de Menzel, mas com as variáveis que Uno (1998) utilizou, apresentado na Figura 2.3.

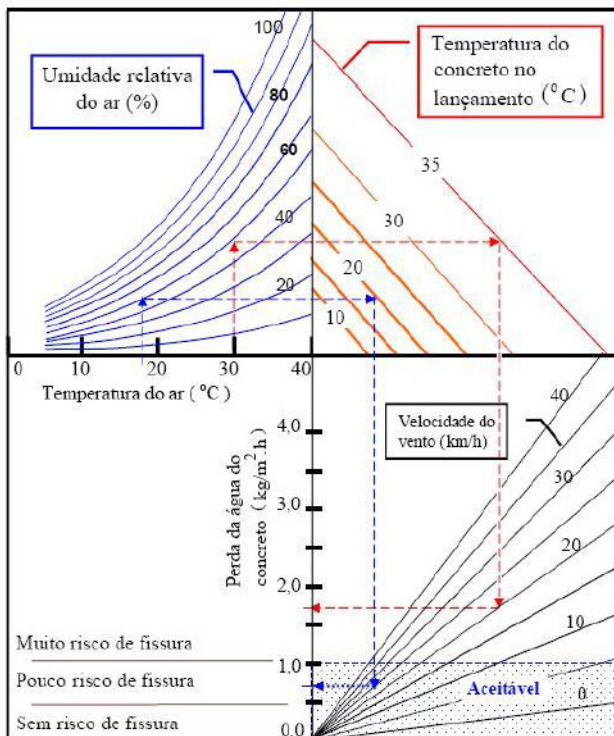


Figura 2.3: Nomograma para estimar a taxa de evaporação de uma superfície de concreto

Fonte: ACI 305R-99

A temperatura do concreto utilizada na equação e no nomograma do ACI é aquela referente à água que exsuda na superfície, pois é ela a necessária para o estabelecimento da diferença de pressão de vapor entre o ar e a superfície de água exsudada. Visto a dificuldade de medir este fator, é comum assumir o valor da temperatura do concreto como a requerida (UNO, 1998).

Uma observação relevante feita pelo ACI Committee 305 (1999) é a de que tanto a equação quanto o nomograma, levam ao encontro de uma taxa de evaporação de água da superfície. Todavia, quando não há esta água superficial, os valores obtidos tendem a ser superestimados com fatores de multiplicação que podem variar de dois ou mais. O correto, segundo Dao *et al.* (2010), seria utilizar o valor encontrado como uma indicação de evaporação potencial das condições

ambientais, e não a atual taxa de perda de água da superfície do concreto.

O ACI recomenda que “precauções devem ser tomadas quando a taxa de evaporação esperada é próxima a 0,2 lb/ft²/h (1,0 kg/m²/h).” Já o código canadense (*apud* Dao *et al.*, 2010) designa 0,75 kg/m²/h como um valor crítico. Enquanto isso, referências australianas (*apud* Dao *et al.*, 2010) têm 0,5 kg/m²/h como um valor a partir do qual se deve estar alerta e 1,0 kg/m²/h para provável aparecimento de fissuração por retração plástica.

Conforme frisa Uno (1998), os valores limites para a evaporação podem variar muito, de acordo com o tipo de mistura utilizada. Assim, a proteção contra a sua ocorrência pode ser feita obrigatória em especificação a fim de eliminar a incerteza da necessidade ou não de medidas precatórias, tais como a moldagem durante o período noturno, a utilização de diferentes formas de cura, entre outras.

2.1.2 Exsudação

Exsudação é o fenômeno cuja manifestação externa é o fluxo ascensional de água oriunda da sedimentação dos materiais de uma mistura cimentícia recém-moldada e compactada, porém antes de atingir o tempo de início de pega. A água é separada por segregação porque os sólidos em suspensão tendem a descer devido à sua maior densidade, ocupando níveis menores de altura no elemento (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

Quantitativamente, segundo Dao *et al.* (2010), a exsudação pode ser expressa como um assentamento total por unidade de altura do concreto, uma porcentagem de água de amassamento, ou como uma taxa de exsudação. Essas propriedades da exsudação podem ser mensuradas experimentalmente usando métodos padrão. Neville (1997) lembra que taxa de exsudação é, em geral, inicialmente constante, mas em seguida diminui continuamente, chegando ao fim com o endurecimento da pasta de cimento.

Dentre os muitos fatores que afetam a disposição à exsudação do concreto, as propriedades do cimento utilizado são consideradas as mais importantes. A exsudação é diminuída por cimentos mais finos e em maior quantidade na pasta, possivelmente pelo fato das partículas finas hidratarem mais cedo e também por sua menor permeabilidade. A presença de alto teor de C₃A (aluminato de cálcio) e o uso de concretos

de alto desempenho com menor relação a/c também podem influenciar na diminuição da exsudação (NEVILLE, 1997).

De acordo com Dao *et al.* (2010), um certo nível de exsudação é necessário para substituir a perda de água pela evaporação e então prevenir a secagem precoce da superfície de concreto antes que este tenha atingido resistência à tração suficiente para não sofrer fissuração. No entanto, a exsudação excessiva pode causar fissuras por assentamento plástico, aumento do período até o endurecimento, produção de nata cimentícia na superfície, diminuição da resistência e pobre ligação entre as partículas internas.

Até os anos 60, conforme citado por Uno (1998), a taxa de exsudação de concreto foi assumida como variando entre 0,5 e 1,5 kg/m²/h. Contudo, esses valores modificaram com o tempo, sendo utilizado menos de 1,0 kg/m²/h para concretos comuns a partir do final dos anos 90 (AL-FADHALA e HOVER, 2001).

2.1.3 Fatores que influenciam a retração plástica

Sob uma perspectiva ampla, Caldas (1997) cita três características, que combinadas levam o concreto a retrair: a) a geometria da estrutura, b) o concreto utilizado e c) fatores ambientais.

2.1.3.1 Geometria da estrutura

Como citado anteriormente, quanto maior a superfície exposta às condições ambientais, mais suscetível à retração plástica está o elemento. Mas, além disso, a espessura da seção também é importante, pois, conforme Uno (1998), determina a capacidade de exsudação do concreto. Isto porque uma seção mais espessa irá conter mais sólidos para assentar e, correspondentemente, mais água para exsudar à superfície. Assim, estas seções são menos propensas à fissuração por retração plástica, todavia, elas apresentam maior tendência à fissuração por assentamento plástico.

Devido a este fator, os autores, Ma *et al.* (2004), Kraai (1985), Pelisser *et al.* (2010), Eren e Marar (2010), que avaliaram a retração plástica por motivos diversos em argamassa e concreto utilizaram amostras em formato de placa, com espessuras pequenas, entre 2,0 e 4,0 cm, e com uma área superficial relativamente grande, 91,0x61,0 cm pelos três primeiros pesquisadores e 84,0x54,0 cm por Eren e Marar (2010).

2.1.3.2 Constituintes do material

Diversos fatores relacionados aos materiais que compõem o concreto e suas combinações podem influenciar em sua probabilidade de retrair. Além dos fatores citados que colaboram com a exsudação, sendo estes, em geral, favoráveis à diminuição da retração plástica, Caldas (1997) indica a utilização de agregados com maior módulo de deformação, evitando aqueles com excesso de material pulverulento e argila, bem como a escolha de uma distribuição granulométrica contínua.

Segundo Uno (1998), pesquisas recentes destacam os problemas associados ao uso de apenas 1,0 kg/m²/h para a taxa de evaporação limite. Estes se devem ao fato, por exemplo, de que concretos de alta resistência, contendo altas proporções de cimento (com e sem sílica ativa) apresentam baixas taxas de exsudação e, conseqüentemente, maior suscetibilidade à fissuração por retração plástica.

O uso de redutores de água, superplastificantes, aceleradores e retardadores de pega, entre outros, afetam o estado plástico do concreto de alguma maneira. Uma pesquisa citada por Uno (1998) indica que os concretos contendo superplastificantes, enquanto exsudando menos, tendem a resistir ou estender o início da fissuração por retração plástica devida à modificação na tensão de superfície do material. Além disso, ainda segundo Uno (1998), pesquisas geralmente tem mostrado que o uso de aditivos retardadores de pega, quando usados em excesso, podem tornar o concreto fresco mais suscetível à fissuração por retração plástica devido ao lento assentamento e ganho de resistência da mistura.

Já com relação à adição de fibras, o consenso geral é de que as de polipropileno fornecem certo auxílio na redução do aparecimento de fissuras por retração plástica devido à aderência que proporciona na superfície do concreto plástico, minimizando, desta maneira, a formação de microfissuras em idades iniciais. No entanto, a sua utilização deve ser feita com cuidado para que não diminua excessivamente a trabalhabilidade do concreto, não sendo necessária a adição de água “in loco”, o que diminuiria drasticamente sua resistência final (UNO, 1998).

Os autores já citados (Ma *et al.*, 2004; Kraai, 1985; Pelisser *et al.*, 2010; Eren e Marar, 2010) que pesquisaram este assunto utilizaram grande quantidade de cimento e relação a/c variando de 0,5 a 0,7, a fim de favorecer a fissuração por retração plástica.

2.1.3.3 Fatores ambientais

Como a retração plástica do concreto está intimamente relacionada à perda de água para o ambiente, os fatores climáticos são essenciais neste processo. Entre os principais estão a temperatura, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento que incide sobre a peça recém concretada. No entanto, a radiação solar também pode afetar o desempenho do concreto com relação a esse tipo de retração.

a) Vento

Para Neville (1997), é uma das mais importantes considerações no controle da fissuração por retração plástica, podendo este ser medido ou estimado de muitas formas, que variam do uso de equipamentos específicos até a observação de como se comporta o ambiente, pelo movimento de árvores, fumaça ou ondas. Para essa última alternativa foi criada uma tabela, em 1805, por Beaufort que tem sido usada por muitos anos.

Entretanto, um problema com o uso predeterminado de valores de velocidade do vento, tais como os desta tabela de Beaufort, é verificar o nível em que a mesma foi registrada, uma vez que o vento varia exponencialmente com a altura. Por isso, Kohler, em seu livro “Engineering Hydrology”, citado por Uno (1998), desenvolveu equações para converter os valores de velocidade do vento medidos em altura padrão por Repartições Meteorológicas (10 m) aos necessários para utilização do nomograma do ACI. A partir dela, Uno (1998), chegou a uma relação simples entre estas duas velocidades:

$$V_e = 2/3 * V_{pad} \quad (2.1)$$

onde:

V_e = velocidade equivalente do vento à 0,5 m;

V_{pad} = velocidade do vento na altura padrão 10 m.

b) Temperatura do ar

A medição desta variável é bastante simples e basicamente não diferente dos meios padrão, sendo a única atenção necessária a de aferir a temperatura longe dos raios diretos do sol, minimizando assim a componente de radiação solar direta. É sugerida a leitura três vezes por hora, para calcular a média, e posteriormente, a média diária (UNO, 1998).

c) Umidade relativa

É a relação entre a quantidade de água existente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima que poderia haver na mesma temperatura (ponto de saturação). Quando a umidade relativa atinge 100%, a evaporação normalmente cessa até que outras forças, como o vento, por exemplo, substituam o ar saturado pelo não-saturado. É de fácil obtenção, tanto “in loco”, como pelas informações de Repartições Meteorológicas.

d) Radiação solar

Embora o nomograma do ACI não inclua este item para encontrar a taxa de evaporação da superfície do concreto, seu efeito já foi estudado por vários pesquisadores, sem haver um consenso entre eles. Alguns, de acordo com Uno (1998), encontraram que a radiação solar aumentou a evaporação do concreto de maneira significativa, favorecendo a fissuração. No entanto, outros indicam que, enquanto a radiação eleva a temperatura da superfície do concreto e a velocidade de evaporação, também aumenta a hidratação rápida do cimento e, assim, reforça a superfície do concreto, justificando o fato de, em seus experimentos, as lajes lançadas na sombra às vezes exibirem mais fissuras do que placas expostas ao sol.

2.2 FISSURAS POR FLEXÃO

A fissuração do concreto no estado endurecido provém do trabalho da estrutura estando submetida aos esforços atuantes ao longo do tempo. O projeto estrutural deve considerar a intensidade dessas ações de modo a assegurar um desempenho dentro dos limites aceitáveis de estabilidade e segurança (ISAIA, 2011).

De acordo com Souza e Ripper (1998), falhas humanas durante a concepção do projeto, tais como a modelagem estrutural inadequada, a má avaliação das cargas, o detalhamento errado ou insuficiente, a inadequação ao ambiente e a não consideração da interação solo-estrutura podem ser causadoras de fissuração. No entanto, falhas cometidas pelos usuários das estruturas também favorecem a ocorrência deste tipo de patologia. Dentre as atitudes mais prejudiciais estão as de submeter as edificações a alterações estruturais, ou a sobrecargas exageradas, ou à alteração das condições do terreno de fundação.

As fissuras por flexão ocorrem após o endurecimento do concreto, quando o elemento é submetido a esforços que ultrapassam a

capacidade resistente do material. O surgimento das fissuras pode ser exemplificado tomando-se uma viga biapoiada, submetida a duas forças concentradas P crescentes e de igual intensidade, a partir de zero, como mostra a Figura 2.4 de Leonhardt e Mönnig (1982).

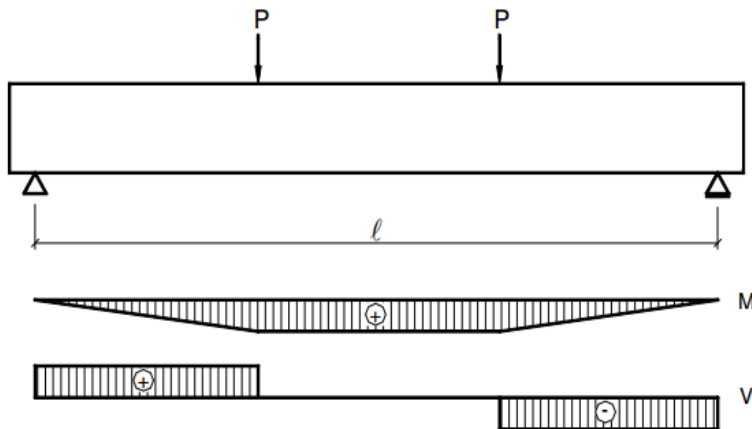


Figura 2.4: Viga biapoiada e diagramas de esforços solicitantes

Fonte: LEONHARDT e MÖNNIG (1982)

Na região de momento máximo, exibida na Figura 2.4, tem-se força cortante nula. Neste trecho central, portanto, ocorre flexão pura. Às diversas fases pelas quais passa a seção de concreto, ao longo desse carregamento, dá-se o nome de estádios, que se distinguem basicamente em três fases distintas: estágio I, estágio II e estágio III.

No início do carregamento, para pequenos valores da força P , a tensão de tração é inferior à resistência do concreto à tração na flexão, fazendo com que a viga não apresente fissuras, ou seja, as suas seções permanecem no Estádio I. Tem-se um diagrama linear de tensões, ao longo da seção transversal da peça, sendo válida a lei de Hooke, conforme mostra a Figura 2.5.

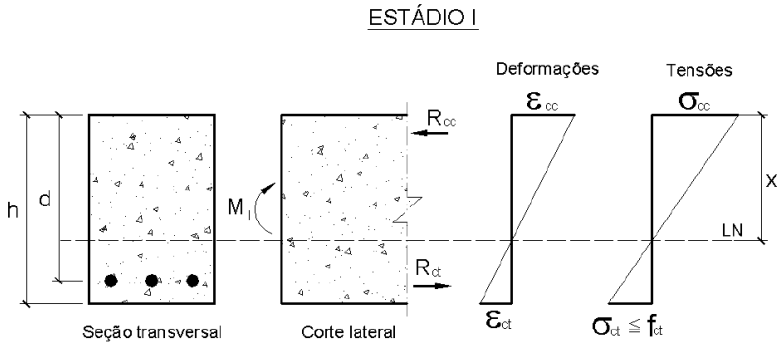


Figura 2.5: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio I)

Fonte: PINHEIRO (2007)

Devido à baixa resistência do concreto à tração, se comparada com a resistência à compressão, percebe-se a inviabilidade de um possível dimensionamento neste estágio.

Segundo a NBR 6118 (2007), nos estados limites de serviço as estruturas trabalham parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II. A separação entre essas duas partes é definida pelo momento de fissuração, que pode ser calculado pela expressão aproximada, exibida na Equação (2.2).

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} \quad (2.2)$$

onde:

α = fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta:

$\alpha = 1,2$ para seções T ou duplo T

$\alpha = 1,5$ para seções retangulares

$f_{ct} = f_{ctk,inf} = 0,21 f_{ck}^{2/3}$ (em MPa)

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto

y_t = distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada.

Conhecido o momento de fissuração, é possível calcular a armadura mínima, de modo que esta seja capaz de absorver, com adequada segurança, as tensões causadas por um momento fletor de mesma magnitude. Portanto, o estágio I termina quando a seção fissura.

Com o aumento da força P , a uma intensidade tal que ultrapasse o limite da capacidade resistente do concreto à tração, as primeiras fissuras de flexão (verticais) começam a surgir na região central da viga, e então, as armaduras longitudinais, inseridas no elemento, passam a combater os esforços desenvolvidos entre as seções das fissuras. Esta região fissurada passa para o estágio II e as fissuras se desenvolvem no sentido da região comprimida da seção, elevando assim a posição da linha neutra e aumentando a tensão na armadura longitudinal. No entanto, a parte comprimida ainda mantém um diagrama linear de tensões (Figura 2.6), permanecendo válida a lei de Hooke.

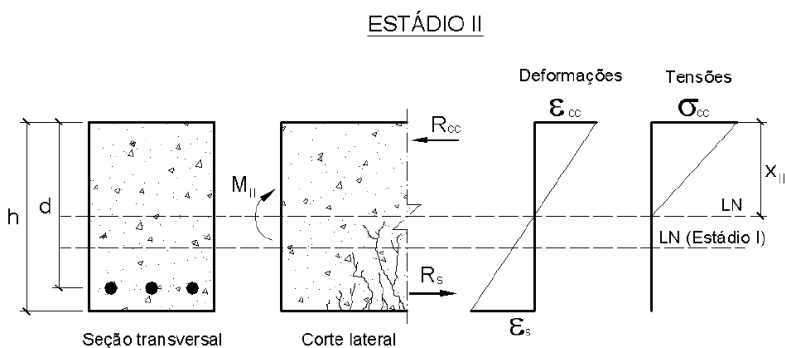


Figura 2.6: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio II)
Fonte: PINHEIRO (2007)

No início do estágio de fissuração, apesar do concreto da região central da viga estar no Estádio II, o concreto nas regiões extremas da peça ainda encontra-se no Estádio I, de acordo como é ilustrado na Figura 2.7.

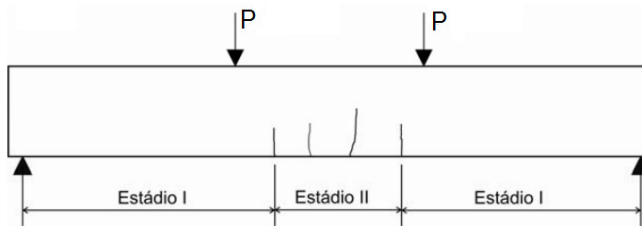


Figura 2.7: Início do estágio de fissuração (fissuras verticais de flexão pura)

A seção entra no Estádio III de deformações e tensões quando o concreto da zona comprimida encontra-se plastificado e na iminência de

ruptura. Admite-se, então, que o diagrama de tensões seja da forma parabólico-retangular, também conhecido como diagrama parábola-retângulo, exibido na Figura 2.8.

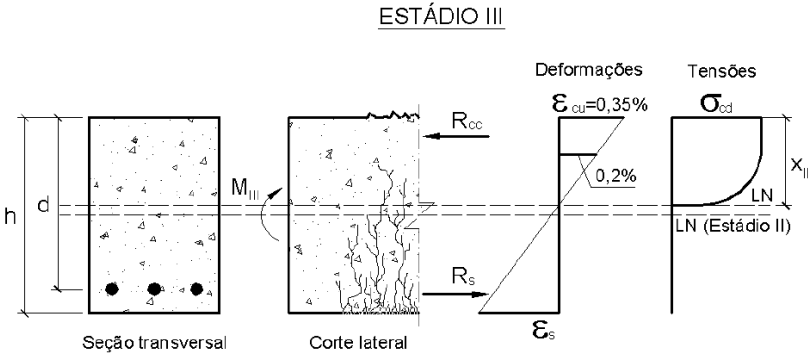


Figura 2.8: Comportamento do concreto na flexão pura (Estádio III)
 Fonte: PINHEIRO (2007)

É neste estágio que é feito o dimensionamento dos elementos estruturais no Estado Limite Último (ELU). A NBR 6118 (2007) permite, para efeito de cálculo, que se utilize um diagrama retangular equivalente, onde a resultante de compressão e o braço em relação à linha neutra devem ser aproximadamente os mesmos para os dois diagramas (Figura 2.9).

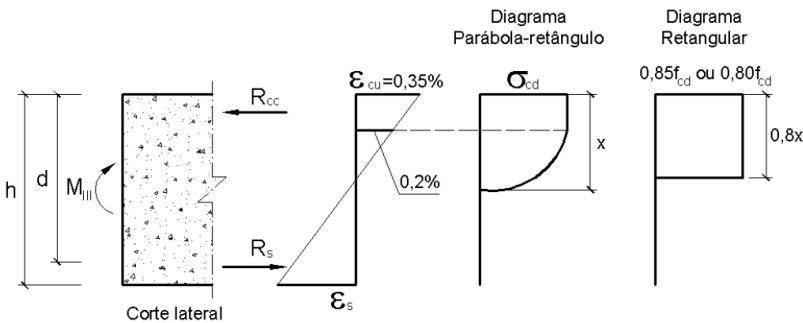


Figura 2.9: Diagrama retangular
 Fonte: PINHEIRO (2007)

A fissuração em elementos estruturais de concreto armado é inevitável, devido à grande variabilidade dos materiais e à baixa resistência à tração do concreto. Assim, o aparecimento de fissuras em

estruturas bem projetadas, construídas e submetidas às cargas previstas na normalização não denotam perda de durabilidade ou segurança quanto aos estados limites últimos.

O controle da abertura das fissuras, no entanto, é essencial para garantir a aceitabilidade sensorial dos usuários e a proteção das armaduras contra a corrosão. A NBR 6118 (2007) traz os limites de abertura recomendados para os diferentes tipos de concreto, armado ou protendido, a fim de garantir a durabilidade das peças, desde que respeitadas as espessuras indicadas e a qualidade do revestimento. Porém, o conforto sensorial dos usuários pode trazer a necessidade de um controle ainda maior destas aberturas.

3. PROPAGAÇÃO DE ONDAS

Onda é uma perturbação que se propaga, de um ponto para outro, através de um meio ou no vácuo, no decorrer do tempo, transmitindo energia sem transporte de matéria (SEARS, ZEMANSKY e YOUNG, 1984).

As ondas eletromagnéticas são originárias de perturbações em campos elétricos e magnéticos, podendo se propagar em meios materiais e no vácuo. Já as mecânicas necessitam de um meio material para se propagar (SERWAY, 1996). Nestas últimas enquadram-se as ondas sonoras, que podem se propagar em um material sólido, líquido ou gasoso (SEARS, ZEMANSKY e YOUNG, 1984).

Segundo SERWAY (1996), as ondas audíveis ao ouvido humano possuem frequências entre 20 e 20000 Hz, as infrassônicas têm frequência abaixo do limiar de audição e as ultrassônicas tem frequência acima deste.

Sabe-se que a velocidade de propagação do som na maioria dos sólidos é maior do que em líquidos, e nestes é maior do que nos gases. Isto é muito importante no entendimento e análise dos resultados dos ensaios de determinação da velocidade de propagação do pulso ultrassônico em diferentes concretos.

3.1 ULTRASSOM

A teoria da elasticidade fornece uma completa descrição das propriedades estáticas de um sistema mecânico. Parâmetros tais como o módulo de elasticidade podem também ser usados para descrever propriedades dinâmicas ao longo da faixa de frequência ultrassônica CHEEKE (2002).

Assim, considera-se um elemento de comprimento l sofrendo um alongamento du devido a uma força externa F no sentido positivo da direção x , conforme a Figura 3.1.

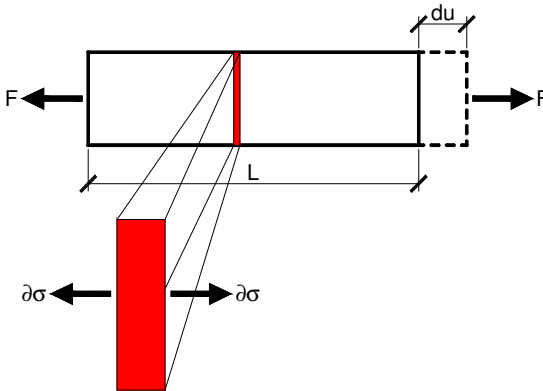


Figura 3.1: Caso uniaxial de tensões

A tensão externa é $\sigma = F/A$, então a tensão no elemento é $\partial\sigma = l(\partial\sigma/\partial x)$. Isto indica um fluxo de força por unidade de volume em um elemento igual a $\partial\sigma/\partial x$. A deformação é:

$$\varepsilon = \frac{du}{l} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.1)$$

onde:

du = deslocamento diferencial

$\frac{\partial u}{\partial x}$ = diferencial parcial do deslocamento

Escrevendo a segunda Lei de Newton, $F = ma$:

$$\frac{\partial\sigma}{\partial x} = \rho a \quad (3.2)$$

Combinando com a Lei de Hooke, dada por $\sigma = E\varepsilon$, chega-se a equação do movimento:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3.3)$$

A velocidade, em km/s, é dada, então, por:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.4)$$

onde:

E = módulo de elasticidade dinâmico (N/mm²)

ρ = densidade do material (kg/m³)

As ondas longitudinais, mostradas na Figura 3.2, também chamadas de compressão, ou ainda ondas-P propagam-se através de um meio sólido com uma tendência análoga à propagação de ondas de som no ar. Suas partículas de deslocamento estão na direção do trajeto da onda e, por isso, apresentam a maior velocidade entre os três tipos de onda existentes, criados quando a superfície de um meio elástico sólido é perturbada por uma carga dinâmica ou vibratória (NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004).

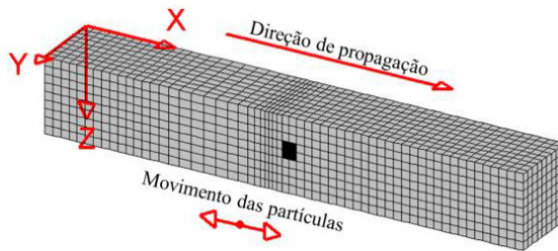


Figura 3.2: Ondas longitudinais

Fonte: BRAILE (2013)

Pelas equações da teoria da elasticidade, para um meio infinito, elástico, homogêneo e isotrópico, expandida para um caso tridimensional, a equação da velocidade (3.4) apresenta um coeficiente, aqui chamado K , que multiplica o módulo de elasticidade dinâmico.

$$K = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (3.5)$$

onde:

ν = coeficiente dinâmico de Poisson

O coeficiente K varia em um intervalo bastante estreito, devido aos baixos valores de ν . Desta maneira, sua influência na velocidade de pulso é pequena, o que permite sua utilização também para o concreto,

um meio que não se enquadra exatamente nas propriedades acima citadas. Para este, a taxa de variação de V está entre 3000 e 5000 m/s (NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004).

O segundo tipo de onda mecânica são as ondas transversais, também denominadas de cisalhamento, ou ondas-S, ilustradas na Figura 3.3.

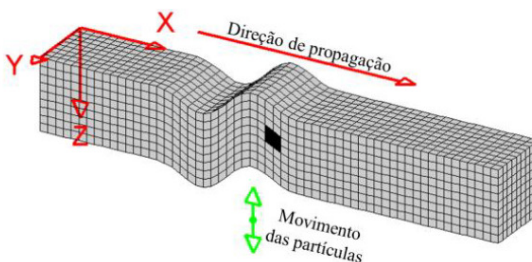


Figura 3.3: Ondas transversais

Fonte: BRAILE (2013)

Elas apresentam partículas de deslocamento de ângulos retos. No concreto, sua velocidade (V_t - velocidade das ondas transversais), calculada pela Equação (3.6), é tipicamente 60% daquela em ondas de compressão.

$$V_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (3.6)$$

O terceiro e último tipo pode ser chamada de ondas de superfície ou ondas de Rayleigh (Figura 3.4). Estas, com partículas de deslocamento elíptico, apresentam, em geral, 55% da velocidade obtida pelas ondas de compressão no concreto.

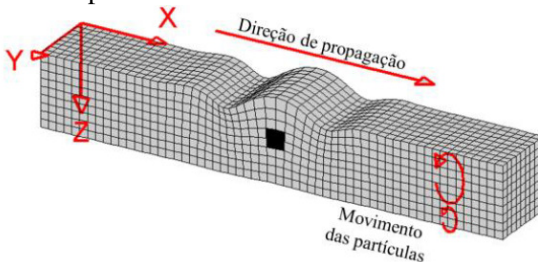


Figura 3.4: Ondas de superfície

Fonte: BRAILE (2013)

Este valor pode ser obtido, em um material ideal, através da resolução de uma equação de sexto grau. Por esse motivo não há uma fórmula exata para calcular sua velocidade. No entanto, Viktorov (1967), *apud* Naik, Malhotra e Popovics (2004), desenvolveu uma expressão aproximada exibida na Equação (3.7).

$$V_r = \frac{0,87 + 1,12\vartheta}{1 + \vartheta} * V_t \quad (3.7)$$

onde:

V_r = velocidade das ondas de superfície

3.1.1 Ensaio de ultrassom no concreto

O método da velocidade de pulso ultrassônico tem sido usado com sucesso para avaliar a qualidade do concreto desde a década de 40. Este pode ser empregado para detectar fissuras internas e outros defeitos, assim como mudanças no concreto, tais como deterioração devida a ambientes químicos agressivos (NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004).

Além das aplicações acima citadas, devido ao fato do módulo de elasticidade e da resistência do concreto crescer com a maturidade, é possível que, com a velocidade dos pulsos, possa-se dispor de um meio para estimar a resistência do concreto embora não exista relação física direta entre essas duas propriedades (ACI 228, 2003).

Este ensaio é verdadeiramente não destrutivo, pois a técnica não resulta em danos ao elemento testado. A possibilidade da repetição do teste em um mesmo local é útil para o monitoramento do concreto submetido a mudanças estruturais internas durante um longo período de tempo (NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004).

Segundo Bungey, Millard e Grantham (2006), o equipamento de ensaio deve fornecer um meio para gerar um pulso, transmiti-lo ao concreto, recebê-lo e amplificá-lo, medindo e mostrando o tempo despendido ao longo do trajeto, conforme Figura 3.5.

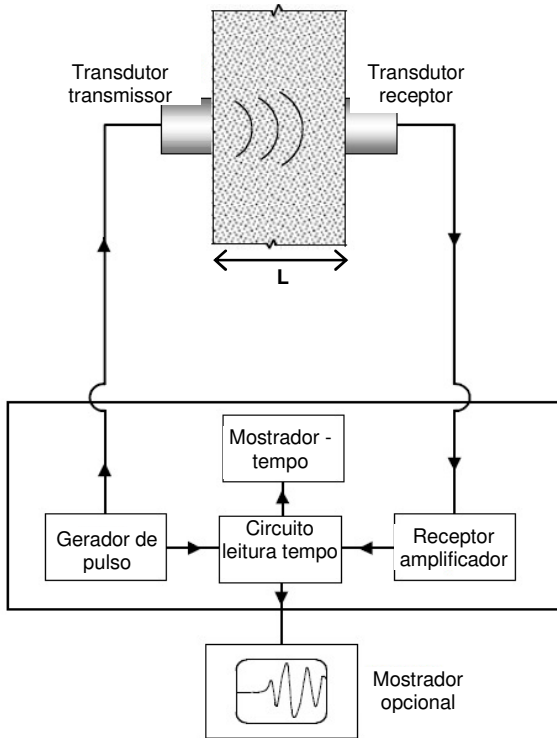


Figura 3.5: Esquema de funcionamento do ultrassom

Fonte: Naik, Malhotra e Popovics (2004)

Os transdutores utilizados, em geral, são constituídos de discos de material piezoelétrico, que vibram quando submetidos a uma corrente alternada, produzindo ondas de pressão na direção normal ao disco. Esta vibração é então transferida à peça de concreto em forma de energia mecânica. As ondas geradas são captadas por um transdutor receptor acoplado ao concreto a uma distância conhecida (L) do transdutor transmissor, onde a energia mecânica é convertida novamente em pulsos elétricos de mesma frequência (NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004). O visor do aparelho indica o tempo de trânsito, Δt , para que o pulso atravesse o concreto. A velocidade deste pulso, de acordo com a NBR 8802 (1994) e a NM 58 (1996), é dada pela Equação (3.8).

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (3.8)$$

Para transmitir e receber o pulso, os transdutores devem estar em total contato com o objeto em teste; caso contrário, uma camada de ar entre eles pode introduzir um erro neste tempo de trânsito. Este erro ocorre, porque somente uma insignificante quantidade de energia pode ser transmitida através do ar. Muitos acoplantes disponíveis no mercado podem ser usados para garantir este contato, tomando-se o cuidado de manter uma camada mais fina possível. Enquanto aplicando pressão constante nos transdutores, leituras repetidas em um determinado local devem ser feitas até um valor mínimo de tempo ser obtido. Se a superfície do concreto é muito áspera, maior quantidade de acoplante deve ser utilizado, ou ainda, recomenda-se o nivelamento desta superfície por procedimentos diversos (NBR 8802, 1994; NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004).

A frequência de repetição do pulso deve ser baixa o suficiente para evitar a interferência entre pulsos consecutivos, e o desempenho deve ser mantido ao longo de um intervalo razoável de condições climáticas e operacionais. Transdutores com frequência natural entre 20 e 100 kHz são os mais indicados para uso no concreto (BUNGEY, MILLARD e GRANTHAM, 2006).

Transdutores de maior frequência (acima de 100 kHz) são usados para amostras de pequenos tamanhos, com caminhos relativamente curtos, ou concreto de alta resistência. Já os de baixa frequência (abaixo de 25 kHz) são utilizados para grandes amostras ou em concretos com agregados de maior tamanho (NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004).

A frequência f e o comprimento de onda λ de propagação do movimento são relacionadas à velocidade de pulso de acordo com a expressão:

$$V = f\lambda \quad (3.9)$$

A frequência é dada em Hertz (ou ciclos por segundo) e o comprimento de onda por unidade de distância. Em um dado meio, o aumento da frequência, portanto, dita a diminuição do seu comprimento de onda, e vice-versa. Quando a propagação do pulso colide em uma interface com um meio de material com propriedades distintas, uma porção de sua energia é dispersa para fora do caminho original da onda. Por exemplo, vazios, fissuras e partículas de agregados no concreto agem na dispersão de parte da energia inicial do pulso da onda longitudinal para fora de seu caminho. A magnitude da dispersão é especialmente intensa se o comprimento da onda é do mesmo tamanho

ou menor do que o tamanho do dispersor, resultando em uma rápida atenuação (BUNGEY, MILLARD e GRANTHAM, 2006).

Há três configurações possíveis para o arranjo dos transdutores, conforme Figura 3.6.

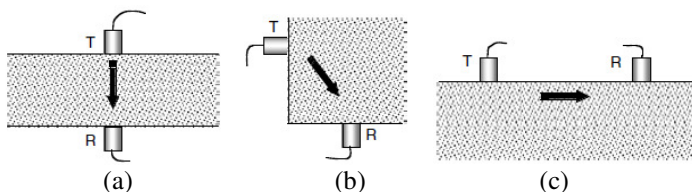


Figura 3.6: Configuração para leituras de ultrassom - (a) direta - (b) semidireta - (c) indireta

Fonte: Naik, Malhotra e Popovics (2004)

O modo direto é o mais desejado e satisfatório, pois a máxima energia é transmitida e recebida nesta disposição.

O semidireto também pode ser usado de forma satisfatória, principalmente quando se deseja evitar concentrações de armaduras. Contudo, cuidados devem ser tomados para que os transdutores não estejam muito afastados; caso contrário o pulso transmitido pode ser atenuado e o sinal não ser detectado.

O arranjo indireto é o menos eficiente, pois a amplitude do sinal recebido é significativamente menor do que o recebido pelo método direto, por isso está mais suscetível a erros. Quando este método de superfície é usado, o pulso se propaga na camada de concreto mais próxima à superfície. Esta camada é, algumas vezes, levemente diferente daquela logo abaixo, principalmente pela existência de maior quantidade de finos na parte superior. Por isso, a velocidade medida por este método é tipicamente menor do que a obtida pelo método direto. (NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004).

3.1.1.1 Influência da temperatura de cura

Segundo o ACI COMMITTEE 228 (2003), as condições de cura do material podem afetar a relação entre velocidade e resistência, especialmente quando é utilizada cura acelerada.

CÂMARA (2006) realizou um estudo do comportamento da velocidade dos pulsos ultrassônicos em concretos com três diferentes resistências: 20 MPa, 25 MPa e 30 MPa, nas idades de 3, 7, 14, 28 e 90 dias. Ele concluiu que, nestes parâmetros, todos os concretos curados

em câmara úmida apresentaram maior velocidade que os concretos curados ao ar. Entre as possíveis razões, tem-se a melhor qualidade no processo de hidratação e uma elevada percentagem de umidade nos poros dos concretos saturados.

Conforme a International Atomic Energy Agency (2002), a temperatura de cura afeta a evolução da hidratação nas primeiras idades. Por isso, tanto a resistência à compressão quanto a velocidade de pulsos ultrassônicos são afetados.

Considerando, entretanto, concretos a um mesmo grau de maturidade, a temperatura na ocasião do ensaio entre 10°C e 30°C não produz influência significativa nas velocidades medidas.

3.1.1.2 Influência das armaduras no concreto

Armaduras, quando presentes, devem ser evitadas, se possível, devido ao aumento da velocidade de pulso ultrassônico neste material. Esta, em um meio de aço infinito, é próximo a 5900 m/s, diminuindo, no entanto, em barras de diâmetro menor, comumente utilizadas com o concreto. Além disso, a barra enclausurada no concreto apresenta ainda diferenciada velocidade, dependendo das condições de aderência entre ambos (BUNGEY, 2006).

Quando a barra de armadura está presente no caminho de propagação da onda, há a passagem da onda de ultrassom do concreto para o aço e deste novamente para o concreto, aumentando a velocidade de propagação final e levando a imprecisões na estimativa da resistência/homogeneidade da peça estrutural, conforme salienta Dornelles, Pinto e Padaratz (2004).

Para barras posicionadas paralelamente à propagação da onda, o tempo obtido de propagação é função da distância do transdutor em relação à barra devido ao caminho que a onda percorre, conforme a Figura 3.7.

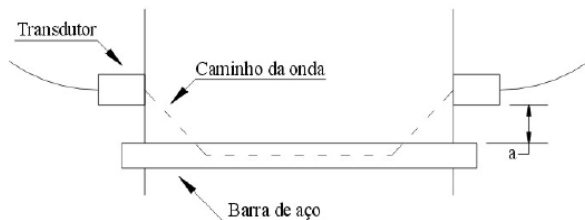


Figura 3.7: Barras paralelas à propagação da onda de ultrassom

Fonte: Dornelles, Pinto e Padaratz (2004)

Bungey (2006) estabelece uma relação entre a velocidade medida somente no concreto (V_c) e aquela referente ao material com armadura (V_m). Esta relação baseia-se em um coeficiente k , o qual multiplica o V_m e é dado por:

$$k = \frac{V_c}{V_s} + 2 \left(\frac{a}{L} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{V_c}{V_s} \right)^2} \quad (3.10)$$

onde:

L = comprimento total do material;

a = distância entre o transdutor e a barra de aço (Figura 3.7)

V_s = velocidade da barra de aço embebida no concreto, que depende do seu diâmetro.

Em seus experimentos, Dornelles, Pinto e Padaratz (2004) avaliaram a influência na velocidade de pulso ultrassônico pela presença de barras de aço no concreto. Foram avaliadas barras de 10, 16 e 25 mm, aos 3 e 33 dias. O coeficiente k foi calculado através da Equação (3.10) e comparado com os resultados experimentais. Na Figura 3.8 são apresentados os resultados da barra de 10 mm.

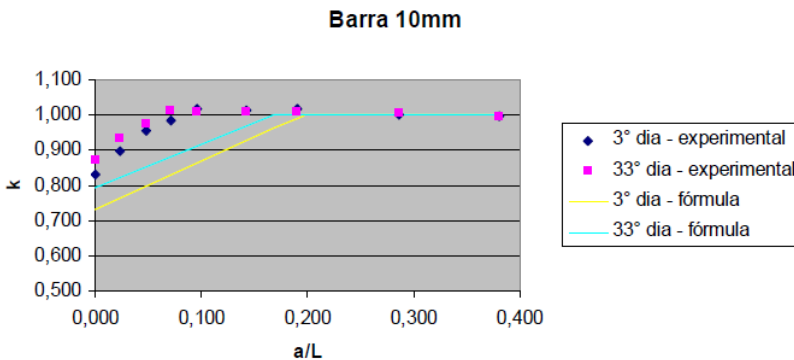


Figura 3.8: Valores dos coeficientes k obtidos no experimento e estimados pela Equação (3.10) em função da relação a/L

Fonte: Dornelles, Pinto e Padaratz (2004)

Percebe-se que a equação gera resultados conservadores, se comparados ao que ocorreu na realidade. Por isso, Dornelles, Pinto e Padaratz (2004) salientam que informações existentes na literatura não devem ter um caráter universal. Os estudos devem ser adequados a cada

realidade, considerando principalmente a natureza dos materiais utilizados e cuidados operacionais nas leituras.

Com relação a barras transversais ao caminho da onda, a influência é pequena, existente somente em diâmetros maiores do que 10 mm, como mostra a Figura 3.9.

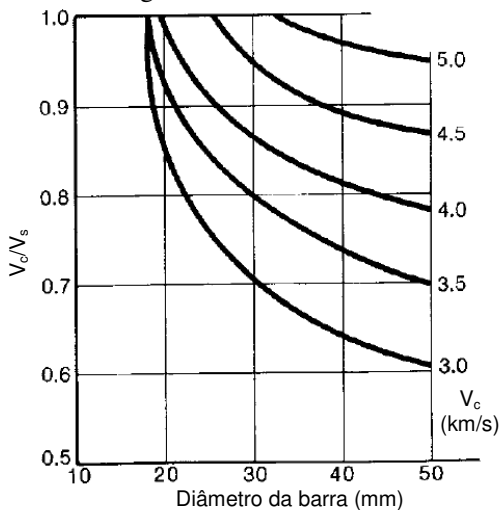


Figura 3.9: Relação entre a velocidade de pulso no concreto e no aço em função do diâmetro da barra em leituras transversais

Fonte: Bungey (2006)

3.2 ANÁLISE DO FORMATO DA ONDA PROPAGADA PELO ULTRASSOM PARA AVALIAÇÃO DE DANOS

Inicialmente, neste trabalho, define-se como dano qualquer não homogeneidade existente no concreto ou argamassa que é causada por fatores alheios ao material por eles compostos, ou seja, que não esteja ligado à heterogeneidade originada, por exemplo, pelos agregados graúdos no concreto. Isto significa que estes danos podem ser vazios, fissuras e discontinuidades em geral, originadas por condições diversas.

Já é de senso comum e comprovado em inúmeros estudos que o concreto com danos geralmente exhibe menor velocidade de pulso ultrassônico do que o material são. No entanto, pesquisas vêm sendo desenvolvidas a fim de mostrar que essa capacidade de detecção de lesões no material através da velocidade de pulso do ultrassom é limitada a diversos fatores.

Não se pode estabelecer uma única relação entre danos e a velocidade de pulso no concreto, devido a não homogeneidade do material por si próprio. Diferentes tipos de cimento, relação a/c, agregados graúdos e miúdos, tipos e granulometria, e ar incorporado fazem qualquer mistura única. Adicionalmente, o formato do dano não é sempre o mesmo; as fissuras, por exemplo, variam da ordem de micrômetros a centímetros. Também considerando a orientação e número de fissuras (ou volume de danos), é possível entender que todas estas características citadas fazem qualquer estrutura diferente e o trabalho de quantificar os danos complicado (SHAH *et al.*, 2000; SELLECK *et al.*, 1998; HAUWAERT, THIMUS e DELANNAY, 1998).

Para Bungey (2006), mesmo a microfissuração do concreto é suficiente para modificar o caminho de propagação da onda ultrassônica. Citando sua própria pesquisa em 1980, diz ter encontrado diminuição da velocidade de pulso em um cubo de concreto submetido a esforços de compressão quando estes atingiram 50% de sua resistência. Enquanto isso, Shah e Chandra (1970) e Raju (1970) *apud* Suaris e Fernando (1987) perceberam variação significativa desta velocidade apenas aos 90% do pico de tensão de compressão em amostras cilíndricas de concreto.

Sabendo que o crescimento da fissura ocorre em menores níveis de tensão, Suaris e Fernando (1987) mencionam a necessidade de um indicador mais sensível.

A utilização de meios (osciloscópios, *softwares*) para obter o formato da onda gerada pelo ultrassom tornou possível a sua análise, buscando nela melhores resultados quanto à identificação de danos no concreto. Com isso, atualmente a aquisição do formato da onda é padrão para a maioria dos equipamentos de teste de ultrassom. Assim, características importantes de sua propagação podem ser analisadas através de parâmetros obtidos pela análise desta onda (HAUWAERT; THIMUS; DELANNAY, 1998). Alguns destes parâmetros, que serão descritos a seguir, são: velocidade de grupo, amplitude máxima, energia, pico de frequência e frequência central.

Aggelis e Shiotani (2008) afirmam que, apesar da dispersão da energia da onda afetar as medidas de amplitude, diminuindo seus valores conforme é aumentada a dispersão, o pulso emitido pode percorrer o material da mesma maneira, e disparar a aquisição de tempo do aparelho. Esse fato levará a velocidades de pulso similares ao material são, mascarando a existência de problemas. Isso explica por

que não homogeneidades, mesmo capazes de reduzir as amplitudes da onda, tem influência limitada na velocidade de pulso.

Do mesmo modo, como a velocidade de pulso é característica da componente mais rápida da energia, que viaja através do caminho mais curto, esta não considera a chegada do restante da energia. Neste caso, o uso de um parâmetro que considere todo o pulso ou uma maior parte dele pode ser de grande utilidade (SHIOTANI e AGGELIS, 2009).

As ondas geradas pelo pulso de ultrassom, que percorre um material naturalmente não homogêneo como o concreto, tem características similares à mostrada na Figura 3.10.



Figura 3.10: Formato da onda de ultrassom após passagem pelo concreto, apresentando dispersão

Fonte: QUIVIGER *et al.* (2012)

Como já definido, o concreto representa um meio fortemente heterogêneo para a análise da propagação de ondas elásticas por ultrassom. Os agregados de diferentes formas e tamanhos dificultam a interpretação do formato da onda ultrassônica. Esta onda pode apresentar forte atenuação (redução das amplitudes) e dispersão (modificação do formato da onda).

A dificuldade mostra-se maior quando há a necessidade de detecção de pequenos defeitos. Nestes casos, a utilização de transdutores de frequências usuais, menores do que 100 kHz, não é recomendada. Em transdutores de maiores frequências, no entanto, há uma grande dispersão devido ao fato do comprimento da onda ser da ordem do tamanho dos agregados (QUIVIGER *et al.*, 2012).

Assim, apesar da utilização do formato da onda na análise das respostas do ultrassom ser promissora, principalmente no que diz respeito à avaliação de estruturas com fissuras distribuídas e de diferentes tamanhos, há a necessidade de encontrar parâmetros de análise adequados para isso.

Neste contexto, são inseridos os dois domínios de análise do formato da onda: do tempo e da frequência. Em cada um deles os

parâmetros de estudo são diferenciados e alguns deles serão descritos a seguir, com base em estudos realizados por pesquisadores da área.

3.2.1 Parâmetros de análise no domínio do tempo

O domínio do tempo é o padrão gerado nos aparelhos de ultrassom. A avaliação do formato da onda gerada por eles permite, além da obtenção da velocidade de pulso, a aquisição de outros parâmetros, tais como a velocidade de grupo, amplitude máxima, amplitude pico-a-pico e energia. A Figura 3.11 mostra alguns destes parâmetros.

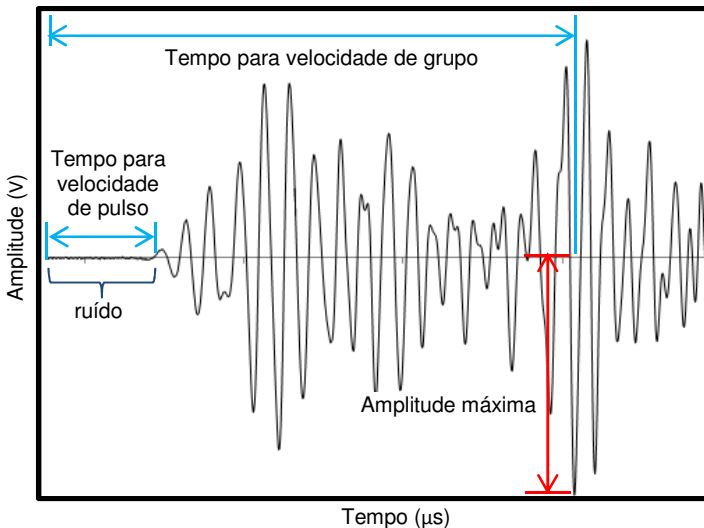


Figura 3.11: Parâmetros selecionados obtidos pelo formato da onda de ultrassom no domínio do tempo - onda obtida através de leitura realizada na lateral de uma placa de concreto sã

A descrição completa de cada um deles será feita a seguir.

3.2.1.1 Velocidade de pulso

A velocidade de pulso depende de um limiar de amplitude no aparelho de ultrassom, que é definido como a maior amplitude de ruído registrada antes de cada medida individual, feita no tempo indicado na

Figura 3.11. Este tempo utilizado no cálculo da velocidade de pulso é indicado no visor do equipamento.

3.2.1.2 Velocidade de grupo

No que diz respeito ao parâmetro velocidade de grupo, Graff (1991) inicia a discussão sobre seu conceito descrevendo ondulações em uma piscina de água. É observado que uma pedra jogada sobre a água parada cria uma intensa perturbação no local que não permanece localizada, mas se espalha para os arredores da piscina. O comportamento subsequente dessa ondulação é o aspecto que chamou a atenção de investigadores há alguns anos.

Segundo Graff (1991), tem sido frequentemente observado que, quando um grupo de ondas avança na água parada, a velocidade do grupo é menor que aquela de ondas individuais das quais é composta (velocidade de fase). Simplificadamente, diz-se que as ondulações parecem se originar na parte de trás do grupo, propagam-se para frente, e desaparecem, tendo assim, uma velocidade maior que a do grupo todo.

A Figura 3.12 exemplifica o que é chamado de velocidade de grupo.

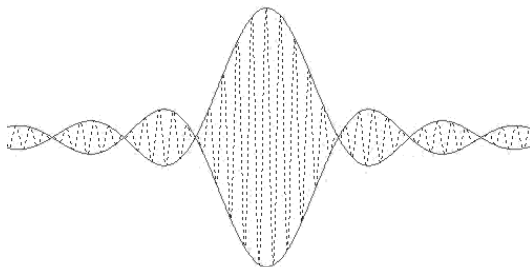


Figura 3.12: Pacote de ondas e sua envoltória

Fonte: MIT (2000)

A linha pontilhada mostra o pacote de ondas, que é um pequeno “envelope” da ação de ondas localizadas que viajam como uma unidade, e a linha contínua é a envoltória deste pacote de ondas. Esta envoltória move-se na velocidade de grupo. A variação periódica do envelope no espaço forma vários pacotes de onda. A velocidade de grupo é apenas a velocidade desses pacotes de onda (MIT, 2000).

Desta maneira, vinculando este conceito às ondas de ultrassom, pode-se dizer que a velocidade de grupo é uma característica que leva

em consideração as últimas chegadas da onda. Em geral, é uma medida da velocidade com a qual a maior parte da energia se propaga. Há diferentes aproximações para seu cálculo. Cowan *et al.* (1998) criaram um envoltório do sinal e usaram o ponto máximo de amplitude para encontrar o tempo e calcular esse valor. Washer, Green e Pond (2002) *apud* Shiotani e Aggelis (2009) usaram o pico máximo do formato da onda e Shiotani e Aggelis (2007) correlacionaram os sinais de emissão e recepção.

Na Figura 3.11, o tempo utilizado para calcular a velocidade de grupo é aquele em que ocorre a amplitude máxima. Esta é uma maneira simples de utilizar este parâmetro.

3.2.1.3 Amplitude pico-a-pico

É o parâmetro que leva em consideração o valor da amplitude entre os primeiros picos positivo e negativo da onda no domínio do tempo. A Figura 3.13 mostra a mudança deste parâmetro em amostras sã e com danos devido à ação do gelo.

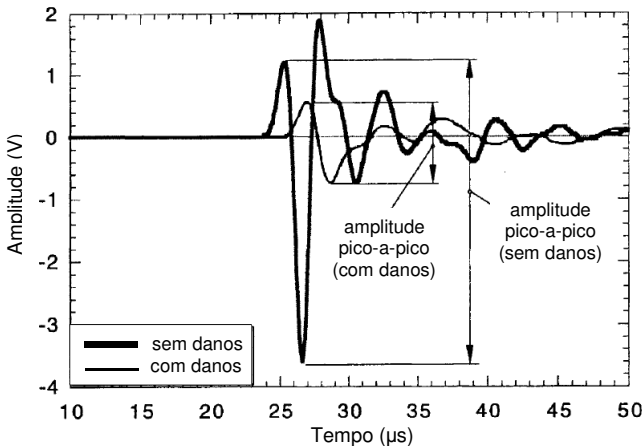


Figura 3.13: Sinal no domínio do tempo ilustrando a amplitude pico-a-pico em diferentes amostra

Fonte: Selleck *et al.* (1998)

3.2.1.4 Energia

A energia é calculada pela área abaixo do sinal retificado (valores negativos transformados em positivos) do envelope de ondas. Esse envelope pode ser definido como a onda por completo ou por parte dela. Ela foi utilizada por Hauwaert, Delannay e Thimus (1998 e 1999) e Shiotani e Aggelis (2008 e 2009), e pode ser descrito pela equação:

$$E = \int_0^{t_i} |A(t)| dt \quad (3.11)$$

onde:

$|A(t)|$ = módulo da amplitude do sinal no tempo t ;

t_i = fim da janela de tempo fixada nos experimentos.

O valor absoluto de energia não tem uma significância, dado a sua dependência do acoplamento entre os transdutores e a amostra, que depende da quantidade de acoplante e da tensão exercida. Por isso, costuma-se utilizar uma análise comparativa deste parâmetro em uma amostra ou estrutura sã e outra danificada.

3.2.1.5 Amplitude máxima

A amplitude máxima, como já mostrada na Figura 3.11, é o valor absoluto do maior pico existente no formato da onda como um todo ou em um grupo específico de análise (um intervalo).

Da mesma maneira que para a energia, o valor absoluto da amplitude máxima não tem uma significância devido aos fatores intervinientes já citados, mas é válida em uma análise comparativa.

3.2.1.6 Energia acumulada

A energia acumulada é baseada no mesmo princípio de cálculo que a energia. No entanto, ela reflete a energia de uma onda acumulada ao longo do tempo, e não somente seu valor absoluto, conforme mostra a curva em preto que vai crescendo com o tempo na Figura 3.14.

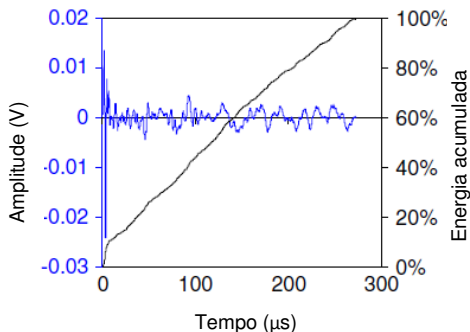


Figura 3.14: Formato da onda e energia acumulada para argamassa sã
Fonte: Shiotani e Aggelis (2009)

3.2.2 Parâmetros de análise no domínio da frequência

A análise da onda no domínio da frequência requer, além da definição de parâmetros, a utilização de recursos matemáticos para obtenção de sua transformada. Através da chamada Transformada Rápida de Fourier (FFT), os dados obtidos pela propagação da onda no material passam a ser plotados em um gráfico “magnitudo x frequência”, também denominado espectro de magnitudo ou espectro de frequências, mostrado na Figura 3.15. Este espectro é gerado pelos sinais do transdutor receptor.

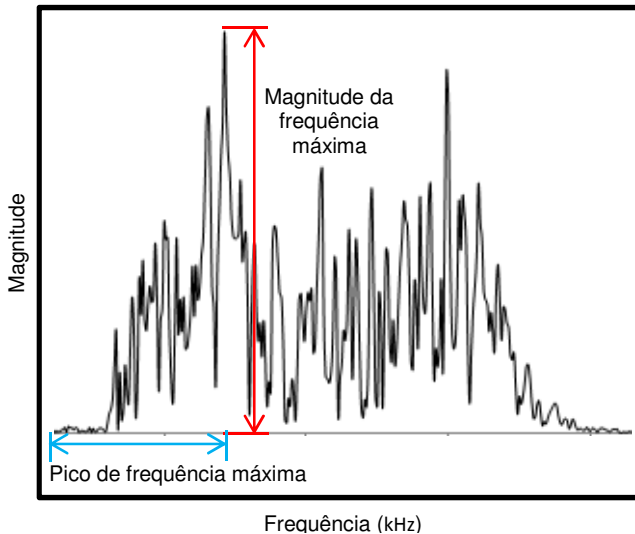


Figura 3.15: Parâmetros selecionados obtidos pelo formato da onda de ultrassom no domínio da frequência

Neste novo domínio, é possível avaliar os parâmetros: pico de frequência máxima, sua magnitude e a frequência central. No entanto, os mais utilizados pelos pesquisadores são o primeiro e último citados.

3.2.2.1 Pico de frequência máxima

Esse parâmetro é obtido pelo valor da frequência onde ocorre o maior pico do gráfico, avaliado no domínio da frequência. A Figura 3.16 mostra a mudança deste parâmetro em amostras com e sem danos.

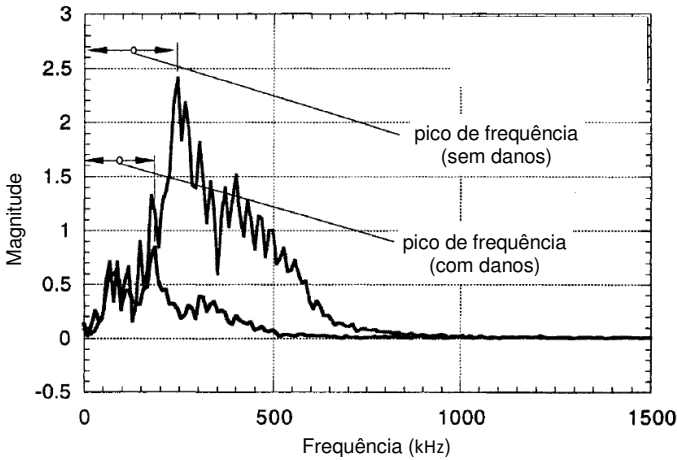


Figura 3.16: Espectro de frequências ilustrando o pico de frequência em diferentes amostras

Fonte: Selleck *et al.* (1998)

3.2.2.2 Frequência central

A frequência central é obtida considerando o centroide do gráfico gerado no domínio da frequência, podendo ser calculada pela Equação (3.12), segundo Aggelis, Momoki e Chai (2009).

$$C = \frac{\int_0^y fM(f)df}{\int_0^y M(f)df} \quad (3.12)$$

onde:

f = frequência (kHz);

$M(f)$ = magnitude da frequência;

y = limite de frequência analisada

3.2.3 Estudos realizados usando parâmetros do formato da onda de ultrassom

Além dos autores já mencionados ao longo do capítulo 3.2, alguns realizaram pesquisas bem específicas sobre este assunto. Referenciam-se aqui estas pesquisas a fim de mostrar os resultados obtidos por eles.

3.2.3.1 Suaris e Fernando (1987)

Suaris e Fernando (1987) utilizaram a velocidade de pulso e a amplitude pico-a-pico para avaliar amostras de concreto com diferentes composições submetidas à compressão uniaxial até o colapso. Os ensaios foram conduzidos usando corpos de prova cilíndricos de 76,2 mm de diâmetro e 152,4 mm de altura, após 28 dias de cura.

Ondas de compressão foram usadas nas direções lateral e axial. Desta maneira, um cilindro de carga especialmente construído com cristal de frequência de 700 kHz incluso foi usado para transmitir e receber os pulsos na direção axial. Já lateralmente, a transmissão de pulsos foi monitorada em duas direções diametricamente opostas usando dois pares de transdutores, um com 500 kHz e outro com 150 kHz (Figura 3.17).

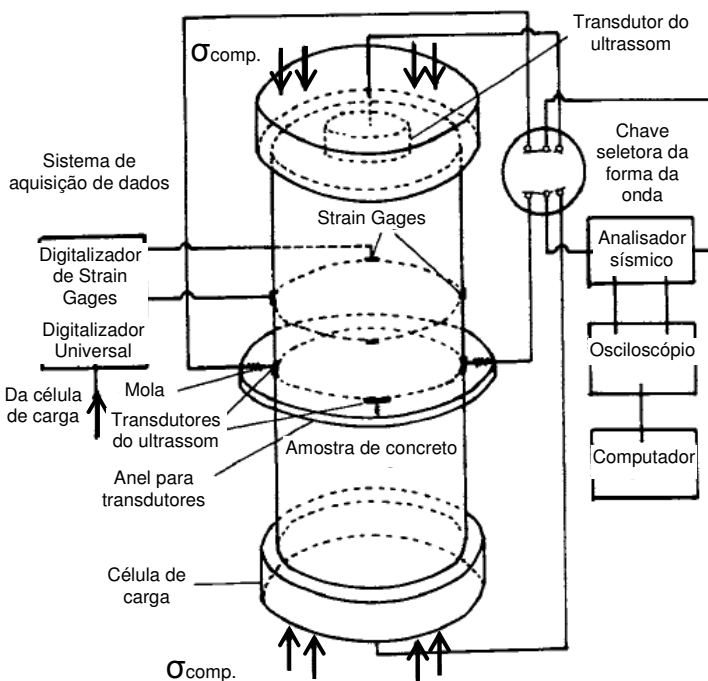


Figura 3.17: Diagrama esquemático da preparação do teste

Fonte: Suaris e Fernando (1987)

Os resultados obtidos de velocidade de pulso estão apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Variação da velocidade de pulso para diferentes amostras submetidas à compressão uniaxial

Amostra	Traço (a/c)	$\sigma/\sigma_{\text{máx}}=0,0$		$\sigma/\sigma_{\text{máx}}=0,90$		$\sigma/\sigma_{\text{máx}}=0,99$		
		Velocidade de pulso axial (m/s)	Velocidade de pulso lateral (m/s)	Redução da velocidade de pulso (%)		Redução da velocidade de pulso (%)		
		700 kHz	150 kHz	500 kHz	150 kHz	500 kHz	150 kHz	500 kHz
A	1:2:3(0,5)	5455	4114	3992	2,9	2,0	5,9	9,8
B	1:2:3(0,4)	5501	4183	4136	1,9	1,5	6,0	7,8
C	1:2:4(0,45)	5516	4183	4053	1,5	2,3	4,0	8,4

Fonte: Suaris e Fernando (1987)

A velocidade de pulso lateral foi em torno de 25% menor do que a do pulso axial. Esta diferença pode ser atribuída à melhor compactação na direção axial devido à moldagem vertical, no entanto, é uma variação bastante elevada quando se trata de um mesmo material. Philippidis e Aggelis (2005) fizeram um estudo da diferença entre a velocidade obtida em amostras cilíndricas de concreto na direção axial e lateral, e, apesar de confirmarem a existência desta variação, o valor máximo encontrado por eles foi de 5%.

A velocidade de pulso, além de permanecer praticamente constante até em torno de 90% do pico de tensão, apresentou diminuição apenas em torno de 12% quando ocorreu o rompimento total.

Já a atenuação da energia obtida pela variação da amplitude pico-a-pico trouxe melhores resultados, como apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Variação da amplitude pico-a-pico para diferentes amostras submetidas à compressão uniaxial

Amostra	$\sigma/\sigma_{\text{máx}}=0,90$		$\sigma/\sigma_{\text{máx}}=0,99$	
	Redução na amplitude (%)		Redução na amplitude (%)	
	150 kHz	500 kHz	150 kHz	500 kHz
A	9	29	55	48
B	12	19	41	55
C	14,5	15	58	67

Fonte: Suaris e Fernando (1987)

Ainda de acordo com Suaris e Fernando (1987), a quantidade de crescimento de fissuras pode ser estimada pela redução da amplitude pico-a-pico da onda através introdução de um coeficiente de dano, definido por:

$$D = 1 - (A/A_0) \quad (3.13)$$

onde:

A_0 = amplitude do formato da onda como medidas do valor pico-a-pico sem carga;

A = amplitude do formato da onda como medidas do valor pico-a-pico sob aplicação de carga;

O coeficiente de dano, como definido, varia de 0, para a amostra sã, até 1 para a amostra totalmente fissurada. A diminuição da amplitude pico-a-pico da onda para as duas frequências é mostrada na Figura 3.18.

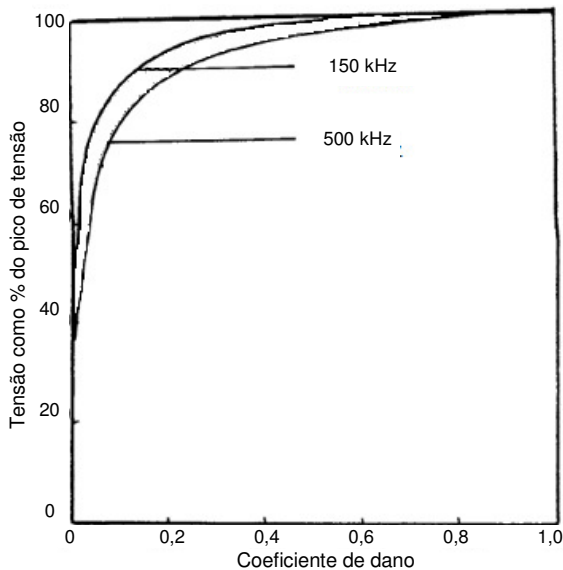


Figura 3.18: Variação do coeficiente de dano para o concreto (traço 1:2:3;0,4) durante compressão uniaxial

Fonte: Suaris e Fernando (1987)

A Figura 3.18 mostra que a atenuação de ambas as frequências começa em torno de 40% do pico de tensão, sendo comparável com os

testes de emissão acústica, que tem mostrado que o crescimento das fissuras começa entre 25 e 50% do pico de tensão (SUARIS e FERNANDO, 1987).

3.2.3.2 Selleck *et al.* (1998)

Nas pesquisas de Selleck *et al.* (1998) cinco amostras de concreto de 40,6x10x7,6 cm foram submetidas ao congelamento e descongelamento (e uma de mesma dimensão foi usada para controlar a temperatura). O objetivo era gerar danos internos de ordem microscópica. O tipo e a quantidade das lesões foram monitorados através da análise feita por um microscópio ótico na amostra seccionada. Este indicou que a ação do gelo no concreto gerou uma microfissuração uniformemente distribuída. Os parâmetros utilizados para análise com o ultrassom foram a velocidade de pulso, a amplitude pico-a-pico e o pico de frequência.

A média dos registros foi feita com quatro leituras para reduzir os efeitos de ruídos casuais. Os transdutores utilizados tinham frequência de 500 kHz, com recepção amplificada de 10 MHz. Três pontos foram escolhidos, pelos quais houve uma varredura linear de leitura, paralela ao comprimento das amostras, com espessuras de leitura constantes, conforme Figura 3.19.

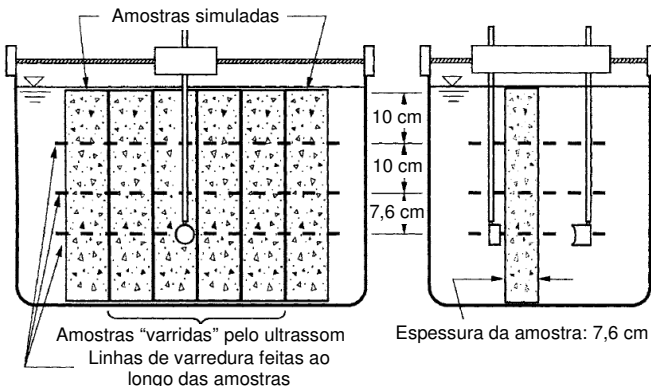


Figura 3.19: Esquema dos locais de leitura de ultrassom

Fonte: Selleck *et al.* (1998)

As leituras de velocidade de pulso na amostra sã mostraram um desvio padrão em torno de 0,7%. O efeito da idade também foi

analisado, gerando um aumento de aproximadamente 3% na velocidade medida nesta amostra entre 28 e 71 dias após a moldagem.

Segundo Selleck *et al.* (1998), a velocidade de pulso, apesar de reduzida pela ação do congelamento e descongelamento, mostrou pouca variação se comparada ao grau de dano gerado. A redução de 25% e 50% no módulo de elasticidade dinâmico, que é um padrão de medida de dano para este tipo de condição, causou redução de somente 3% e 9%, respectivamente, na velocidade de pulso.

Salienta-se que esta variação gerada pelo gelo e degelo é um tanto quanto estranha pelo fato da proporção entre velocidade e módulo de elasticidade dinâmico não estar de acordo com a equação da velocidade (Equação (3.4)).

Com relação à amplitude pico-a-pico, Selleck *et al.* (1998) encontraram um desvio padrão de todos os resultados de 12,5%, considerados por eles como uma ampla dispersão. Assim, sugerem que cuidados devem ser tomados quando se interpreta estes valores. O efeito da idade entre 28 e 71 dias trouxe aumento de 38% neste parâmetro para a amostra sem danos. A redução de 25% e 50% no módulo de elasticidade dinâmico devido a ciclos de congelamento e descongelamento causou redução de 31% e 84% na amplitude pico-a-pico, respectivamente (Figura 3.20).

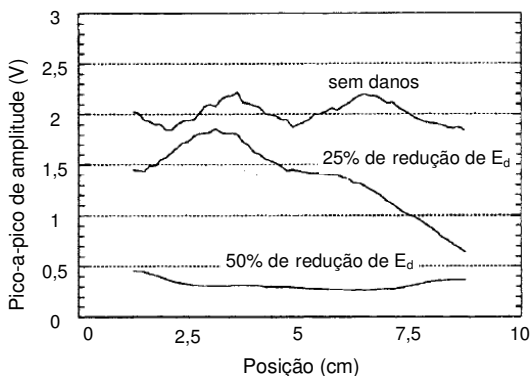


Figura 3.20: Média de três leituras nos pontos especificados em amostras submetidas ao congelamento-descongelamento em três níveis de danos: sem danos, 25% de redução de E_d e 50% de redução de E_d .

Fonte: Selleck *et al.* (1998)

Apesar de resultados aparentemente apropriados para a ação do gelo, como o desvio padrão das medidas de pico-a-pico de amplitude

variaram entre 5% e 24%, é difícil dizer se essa variação é relativa ao dano existente ou meramente erro estatístico (SELLECK *et al.*, 1998).

Já, no que diz respeito aos picos de frequência avaliados, não houve interferência da idade entre 28 e 71 dias na amostra sã, e o desvio padrão de todas as leituras foi de 10,7%. O gráfico obtido está na Figura 3.21.

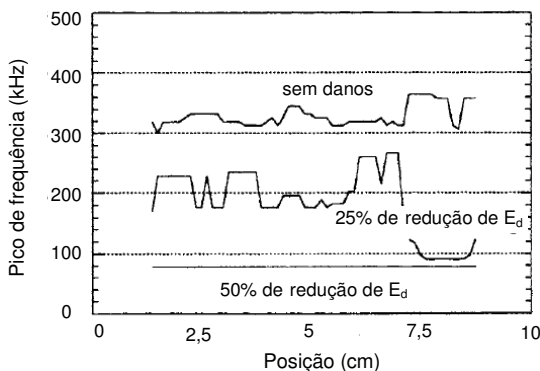


Figura 3.21: Média de três leituras nos pontos especificados em amostras submetidas ao congelamento-descongelamento em três níveis de danos: sem danos, 25% de redução de E_d e 50% de redução de E_d .

Fonte: Selleck *et al.* (1998)

Nas amostras submetidas ao congelamento-descongelamento, a redução de 25% e 50% no módulo de elasticidade dinâmico causou redução de 44% e 76% no pico de frequência, respectivamente.

Percebe-se que as medidas de pico de frequência foram muito mais sensíveis a este tipo de dano do que a velocidade, a qual, conforme citado anteriormente, variou 3% e 9% para estas mesmas reduções no E_d . Contudo, este parâmetro apresentou o mesmo problema que na análise das amplitudes pico-a-pico feita neste estudo. Há a possibilidade do erro estatístico ser confundido com a variação referente ao dano, o que torna os resultados duvidosos.

3.2.3.3 Hauwaert, Thimus e Delannay (1998)

Hauwaert, Thimus e Delannay (1998) avaliaram além do tempo de pulso, a amplitude máxima e a energia no primeiro grupo de ondas encontradas como respostas do ultrassom em cubos de concreto de 150 mm reforçado com fibras de aço, com um entalhe sendo cortado e aumentado progressivamente. O objetivo era estabelecer uma possível

relação entre os resultados do ultrassom e o crescimento da fissura. Entre cada aumento do entalhe, leituras de ultrassom foram feitas nas posições constantes na Figura 3.22. A amplitude gerada foi de 100 V, com largura de pulso de 3 μs e taxa de 40 pulsos por segundo, posteriormente amplificado em sua recepção.

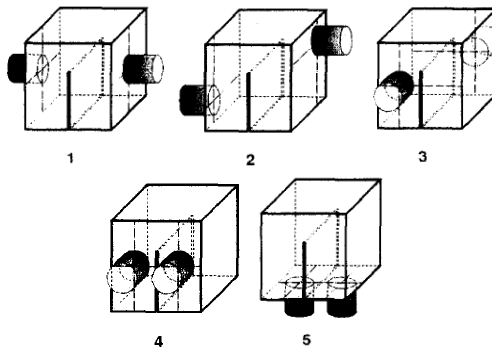


Figura 3.22: Posicionamentos utilizados para leituras de ultrassom

Fonte: Hauwaert, Thimus e Delannay (1998)

Somente a variação relativa dos resultados foi avaliada, por isso que a escala de medições foi dada em percentual de várias plotagens, conforme mostrado na Figura 3.23.

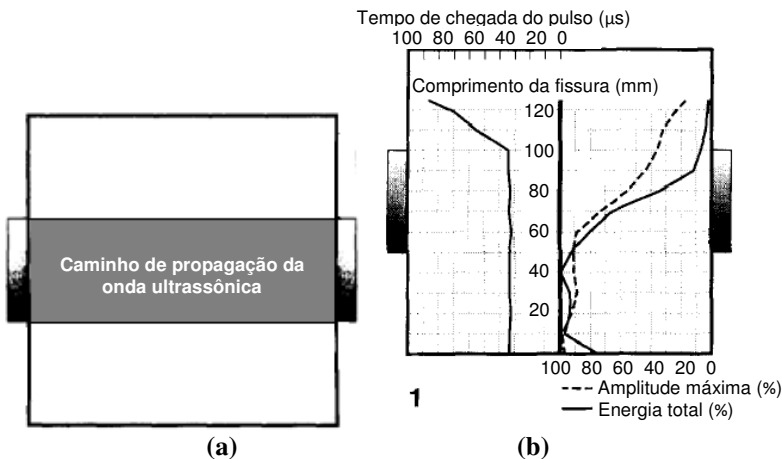


Figura 3.23: Resultados do ultrassom - a) Definição do caminho entre os transdutores; b) Tempo de chegada do pulso, amplitude máxima e energia total das ondas de ultrassom versus crescimento da fissura na posição 1

Fonte: Hauwaert, Thimus e Delannay (1998)

Os resultados revelaram que a diminuição da amplitude e da energia da onda ocorre assim que a fissura alcança a extremidade dos transdutores, como pode ser visto à direita da Figura 3.23-b. Já o tempo de chegada de pulso, mostrado à esquerda da Figura 3.23-b, ocorre somente quando a fissura cruza o caminho existente entre os dois transdutores. Este caminho é ilustrado na Figura 3.23-a. Isso ocorre devido a este caminho não ser uma linha. Assim, enquanto algum material é deixado entre os dois transdutores, uma onda direta pode viajar entre eles. Esta onda perde amplitude e energia, devido à presença do entalhe, mas ainda continua usando o menor caminho que cruza o material. Isto pode ser explicado pelo fato da energia total e amplitude máxima não levarem em conta somente a primeira chegada do sinal e assim o caminho direto entre os transdutores. Elas são geradas por uma parte do sinal, que tem cruzado maiores ou menores porções de material. Um tipo de efeito de massa é então levado em consideração. Isso é evidenciado também pelo fato da energia diminuir mais do que a amplitude, pois a primeira é calculada ao longo de um tempo maior, e inclui mais deste efeito de massa, tornando-se mais sensível.

Hauwaert, Thimus e Delannay (1998) concluíram que se o que interessa é a altura crítica da fissura, os arranjos 1, 2 e 3 podem ser usados, no entanto, na terceira posição é necessário saber onde está a fissura para poder enclausurá-la com os dois transdutores. O arranjo 4 não se mostrou eficiente na análise do crescimento da fissura devido a ocorrência simultânea de ondas de superfície e difratadas, tornando difícil esse trabalho. No arranjo 5, o mérito primordial é de salientar o início da fissuração, no entanto, seu crescimento não foi claramente observado.

Partindo dos resultados acima, Hauwaert, Thimus e Delannay (1998) decidiram ensaiar uma viga de 600x150x150 mm³ de concreto com adição de fibras de aço. O intuito passou a ser a capacidade do ultrassom de mostrar o crescimento de fissuras mais próximas à realidade, tortuosas, finas e com superposições. A seção central foi reduzida com um plástico para criar um entalhe e duas hastes de madeira semicirculares para localizar um caminho de fissuras.

O teste foi feito com flexão a três pontos, fazendo leituras de ultrassom com transdutores posicionados como no arranjo número 1. Os dados resultantes estão na Figura 3.24.

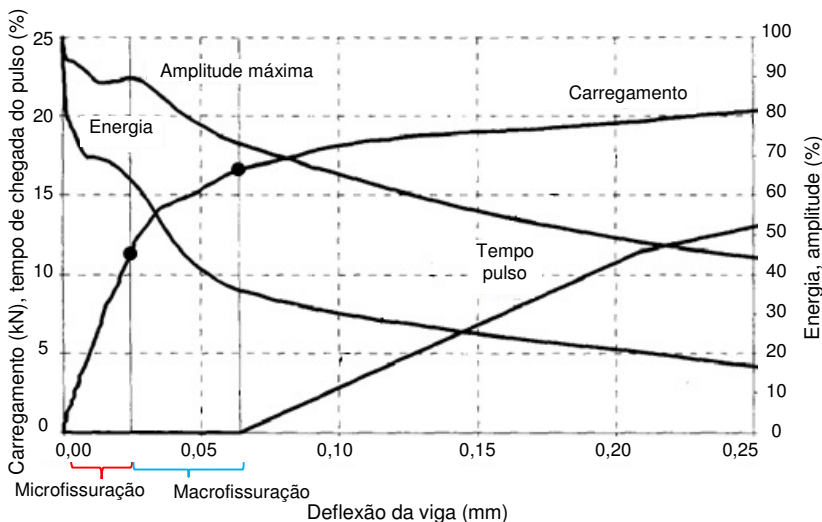


Figura 3.24: Carregamento, energia da onda ultrassônica e velocidade do pulso ultrassônico versus deflexão da viga.

Fonte: Hauwaert, Thimus e Delannay (1998)

Conforme a Figura 3.24, apesar da amplitude máxima e da energia do formato da onda diminuírem em tensões relativamente baixas (com carregamento menor do que 5 kN) devido à microfissuração gerada, outra queda é percebida no pico de amplitude e quando ocorre o início da macrofissuração (primeiro ponto no gráfico do carregamento). Enquanto isso, o tempo de pulso varia somente com o início da macrofissuração.

3.2.3.4 Hauwaert, Delannay e Thimus (1999)

Hauwaert, Delannay e Thimus (1999), assim como fizeram em 1998, usaram vigas de $600 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ de concreto para avaliação dos resultados do ultrassom. Desta vez eles compararam dados de amostras com concreto são, com adição de fibras de aço alinhadas com auxílio de pinças, e com adições depositadas ao acaso (Figura 3.25-b). A redução na seção central foi feita da mesma maneira (Figura 3.25-a).

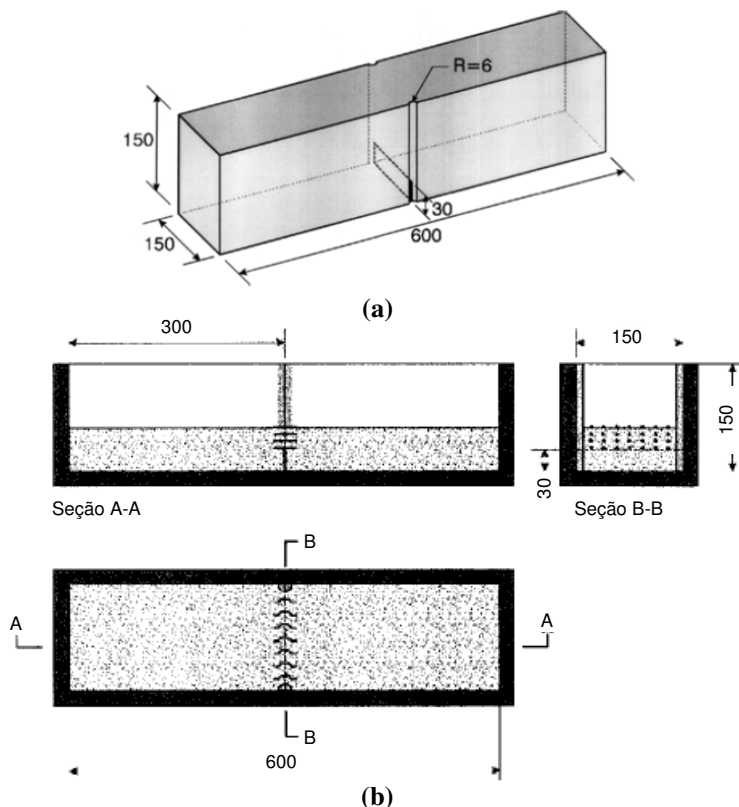
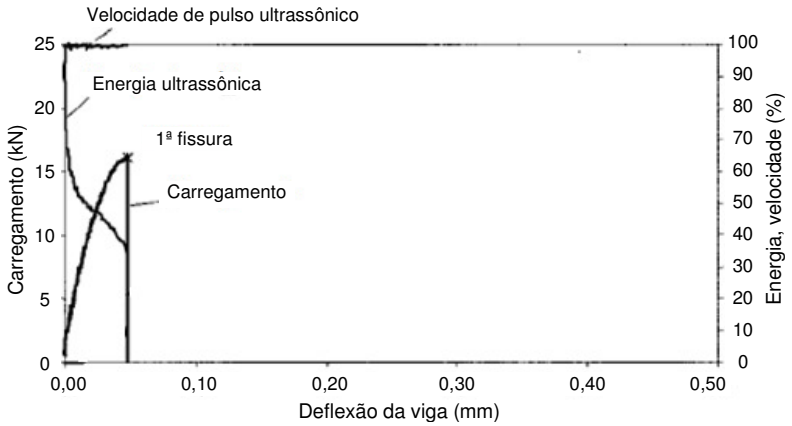


Figura 3.25: Confeção das vigas (dimensões em mm) - a) Geometria da viga; b) Fibras alinhadas com auxílio de pinças na parte central da amostra

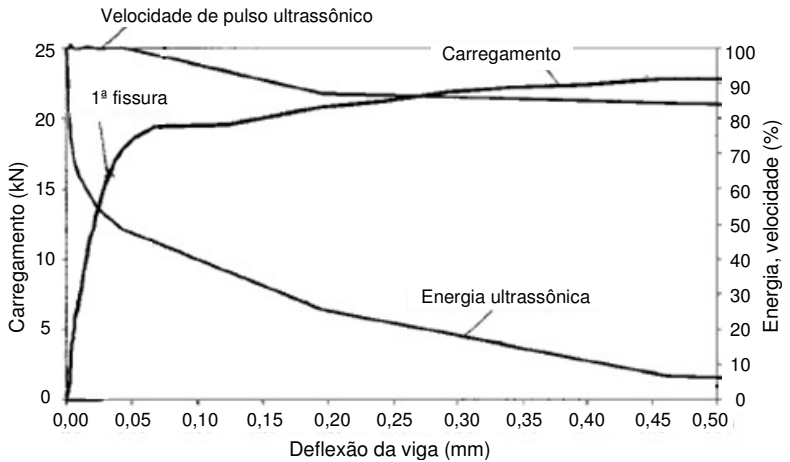
Fonte: Hauwaert, Thimus e Delannay (1999)

O teste de flexão a três pontos foi realizado 28 dias após a moldagem. Ondas longitudinais foram utilizadas através de transdutores de 1 MHz, com emissão de 100 V de amplitude, 40 pulsos/s e $3\mu\text{s}$ de altura.

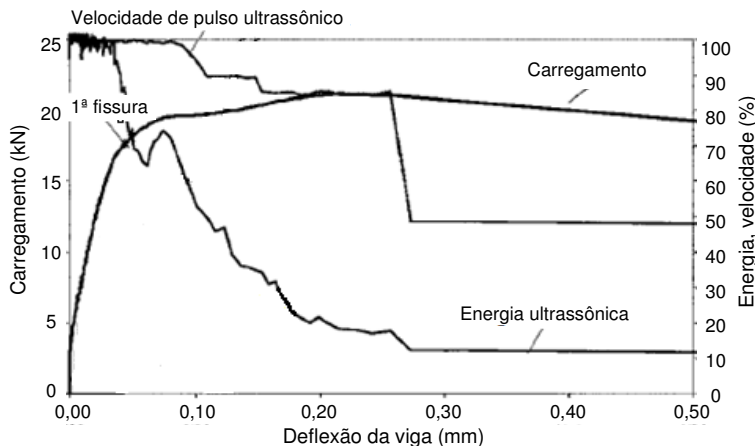
A energia ultrassônica foi medida pela equação já anteriormente citada (Equação (3.11)), sendo considerada somente a variação relativa. Antes do colapso, uma queda da energia ultrassônica da onda foi observada para as diferentes amostras, como pode ser visto em alguns dos resultados constantes na Figura 3.26.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.26: Carregamento, energia e velocidade de pulso versus deflexão da viga - a) concreto sem reforço; b) concreto reforçado com 1% em volume de fibras distribuídas aleatoriamente; c) concreto reforçado com 10 camadas de 49 fibras

Fonte: Hauwaert, Thimus e Delannay (1999)

3.2.3.5 Aggelis e Shiotani (2008)

Nos experimentos realizados por Aggelis e Shiotani (2008), foram utilizados blocos cúbicos (150 mm) de argamassa com diferentes taxas de inclusão de folhas de vinil com dois formatos distintos (15x15x0,5 mm³ e 30x30x0,2 mm³), simulando não homogeneidades. Os parâmetros de análise utilizados foram a velocidade de pulso e a energia. As leituras foram diretas e no modo transmissão. Foi utilizado um gerador de pulso que introduz um pequeno pulso elétrico de duração de menos de 2 μ s, conectado a um transdutor piezoelétrico com maior sensibilidade a menores faixas de frequências (menores do que 200 kHz), comumente usado para o teste de emissão acústica do concreto. O receptor era do mesmo tipo e o sinal foi amplificado para a taxa de 10 MHz. A velocidade de pulso pareceu ser sensível ao dano simulado, mas não fortemente influenciado pela forma da inclusão.

Aggelis e Shiotani (2008) encontraram um desvio padrão entre medidas individuais de velocidade de pulso nos diferentes lados ensaiados de 0,4 % para a argamassa sã e de 1,3% para o material com máxima inclusão (10% em volume). Isto sugere que a dispersão experimental poderia ser estudada para potencial relação com a não

homogeneidade se um número suficiente de medidas pudesse ser feito. Em qualquer caso, entretanto, ela não pode mascarar a diminuição devido ao dano artificial, que é da ordem de 500 m/s, neste experimento.

Na Figura 3.27 é possível ver a queda da velocidade de pulso para ambos os formatos, sendo praticamente linear a variação do parâmetro com a adição de inclusões.

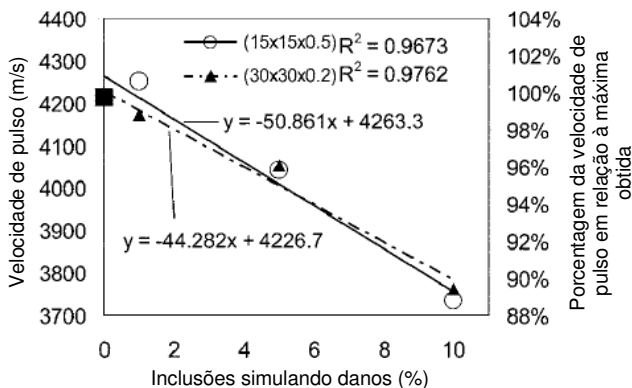


Figura 3.27: Velocidade de pulso versus porcentagem de inclusões de diferentes tamanhos

Fonte: Aggelis e Shiotani (2008)

A argamassa com inclusão de folhas de vinil de 15x15x0,5 mm³ exibe maior velocidade do que àquela com inclusão de formato 30x30x0,2 mm³. Esta é uma indicação de que mecanismos de dispersão são influenciados pelo tamanho e forma da inclusão.

No entanto, Aggelis e Shiotani (2008), ao passo que prosseguiram seus ensaios laboratoriais, concluíram que a energia da onda é mais sensível às inclusões do que a velocidade. O primeiro sinal disso foi percebido na amplitude da onda, a qual foi certamente influenciada pelas inclusões. Pode-se confirmar esta afirmação nas ondas obtidas para as diferentes porcentagens de inclusões simulando danos, na Figura 3.28.

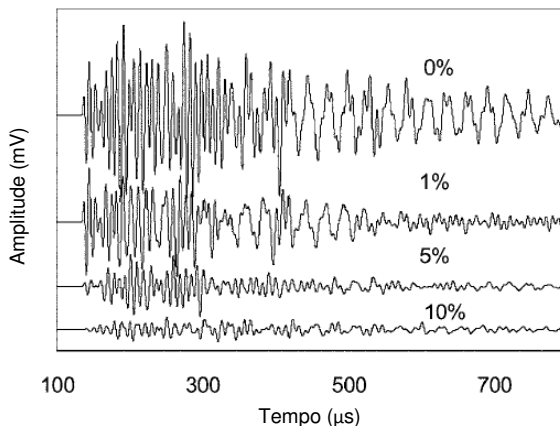


Figura 3.28: Forma da onda para argamassas com diferentes porcentagens de inclusão plástica (danos)

Fonte: Aggelis e Shiotani (2008)

Para utilizar o parâmetro da energia total da onda nas amostras de concreto, Aggelis e Shiotani (2008) a normalizaram em função da energia total obtida da onda lida pelos transdutores face-a-face, acoplados um ao outro. Quando se utiliza essa leitura face-a-face dos transdutores, o ultrassom não encontra um tempo de pulso, pois não há um material entre eles pelo qual percorre a onda, somente é gerada o formato desta onda. Por esse motivo não foi feita essa normalização com o parâmetro da velocidade de pulso.

Assim, foi expressa a porcentagem de energia transmitida através das diferentes amostras em relação ao total do pulso obtido pelos transdutores face-a-face. Na Figura 3.29, essa porcentagem é a que está à esquerda do gráfico, enquanto à direita estão as porcentagens referentes ao máximo obtido pela amostra sem inclusões. A curva assinalada com círculos é referente às amostras com inclusões de $15 \times 15 \times 0,5 \text{ mm}^3$, e a com triângulos às com $30 \times 30 \times 0,2 \text{ mm}^3$.

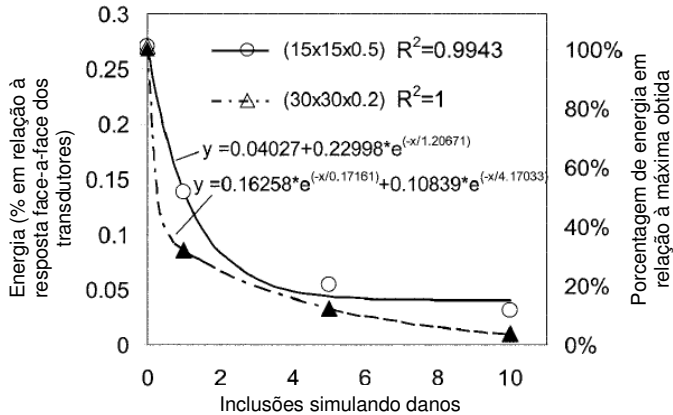


Figura 3.29: Energia total da onda versus porcentagem de inclusões de diferentes tamanhos

Fonte: Aggelis e Shiotani (2008)

Neste caso, equações exponenciais foram adequadas para definir os dados experimentais, as quais aparecem dentro do gráfico na Figura 3.29. Percebe-se a grande sensibilidade deste parâmetro pela maior variação da porcentagem de energia em relação à máxima obtida na argamassa sã (à direita do gráfico). Enquanto a velocidade de pulso na argamassa com maior volume de danos (10% de inclusões) foi aproximadamente 10% menor do que no material sã, a energia total diminuiu em torno de 90%.

O desvio padrão da energia foi de 4,4%, 1,19% e 0,69% para 0%, 1% e 5% de inclusão, respectivamente. Já a argamassa com 10% de inclusão exibiu maior discrepância, da ordem de 23%, que foi inevitável devido à natureza extremamente heterogênea do material.

3.2.3.6 Shiotani e Aggelis (2009)

Com os bons resultados, em sua posterior pesquisa, Shiotani e Aggelis (2009) novamente utilizaram o ultrassom em cubos de argamassa de 150 mm com o mesmo tipo e porcentagens de inclusões para simular danos, mas somente com o formato de 15x15x0,5 mm³. Desta vez, o transdutor empregado foi de 1 MHz e teve o sinal recebido e amplificado para 10 MHz.

Além da velocidade de pulso e da energia, desta vez eles também avaliaram a velocidade de grupo, a amplitude máxima, a energia acumulada e a frequência central.

Na Figura 3.30 é possível perceber os melhores resultados obtidos pela velocidade de grupo se comparada a de pulso.

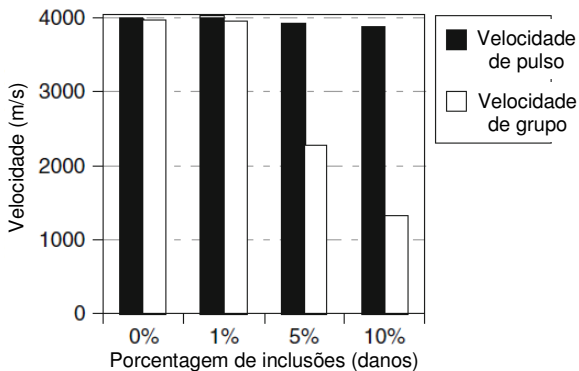


Figura 3.30: Velocidade (de pulso e de grupo) para diferentes percentagens de inclusão na argamassa

Fonte: Shiotani e Aggelis (2009)

Ainda na Figura 3.30 é estabelecido que ambas as velocidades quase coincidem para a argamassa sem inclusões (3992 e 3951 m/s, respectivamente), enquanto que o aumento desta variação em materiais mais heterogêneos (com maior volume de inclusões) torna-se evidente.

Os resultados da amplitude máxima e da energia, normalizados pelos valores da argamassa sã, estão na Figura 3.31.

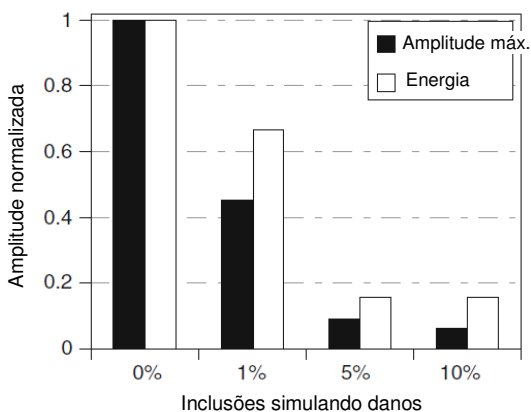


Figura 3.31: Energia e amplitude máxima normalizadas para diferentes percentagens de inclusão (danos)

Fonte: Shiotani e Aggelis (2009)

Neste caso, a amplitude máxima mostrou-se mais eficiente do que a energia, apesar de ambas serem visivelmente sensíveis aos danos existentes.

Já a energia acumulada havia sido empregada por Shiotani e Aggelis em 2007 e foi novamente utilizada em 2009. As curvas obtidas, dentro de um espaço de tempo de 20 μ s iniciais, para todas as porcentagens de inclusão estão plotadas na Figura 3.32.

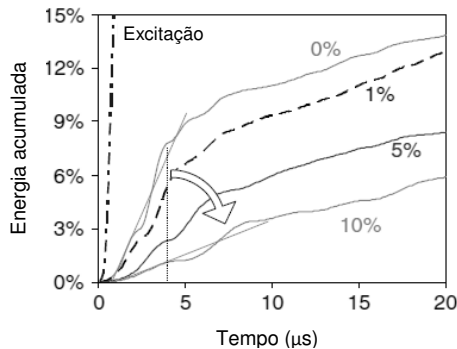


Figura 3.32: Energia acumulada para diferentes porcentagens de inclusão

Fonte: Shiotani e Aggelis (2009)

Como os primeiros ciclos na argamassa são mais significativos, com maiores amplitudes iniciais, há um rápido aumento da energia acumulada nos primeiros poucos microssegundos. Isso faz com que haja uma maior inclinação da curva neste período, com subsequente queda, já que as chegadas tardias são de menor amplitude. Desta maneira, os significativos resultados estão presentes na inclinação inicial desta curva, que diminui sensivelmente com o aumento da quantidade de danos/heterogeneidade.

Enquanto analisando as frequências obtidas pelos espectros em suas diferentes amostras de argamassa, Shiotani e Aggelis (2009) perceberam que o conteúdo em maiores frequências (acima de 200 kHz) é diminuído mais intensivamente com o aumento de inclusões do que nas menores, como mostra a Figura 3.33. Essa tendência é comum para todos os compósitos (PHILIPPIDIS e AGGELIS, 2005; AGGELIS e PHILIPPIDIS, 2004; OWINO e JACOBS, 1999; BECKER, JACOBS e QU, 2003; LANDIS e SHAH, 1995).

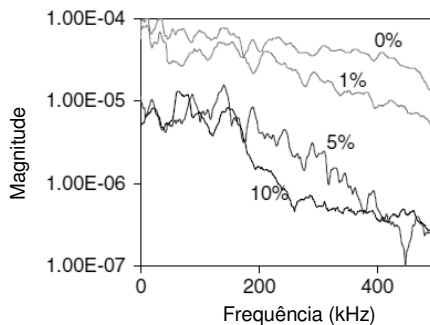


Figura 3.33: Espectro de frequências para diferentes porcentagens de inclusão (danos)

Fonte: Shiotani e Aggelis (2009)

Shiotani e Aggelis (2009), então, optaram por calcular a frequência central do espectro obtido para as diferentes proporções de inclusão na argamassa. Os resultados foram muito favoráveis com relação à caracterização do dano inserido, como pode ser visto na Figura 3.34.

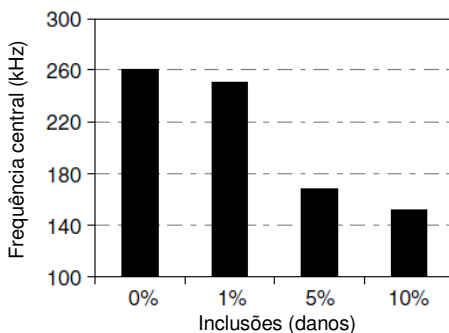


Figura 3.34: Frequências centrais para diferentes porcentagens de inclusão (danos)

Fonte: Shiotani e Aggelis (2009)

A frequência central de 260 kHz na argamassa sem inclusões diminuiu para 150 kHz no material mais “danificado”, com 10% de inclusões, mostrando que este é outro parâmetro que pode melhorar a caracterização das não homogeneidades dos materiais.

3.2.4 Continuidade dos estudos relacionados ao tema

Com base nos resultados satisfatórios obtidos pelos pesquisadores citados, percebeu-se a possibilidade de utilização de um novo método de avaliação dos resultados do ultrassom. O formato da onda propagada pelo aparelho ao longo dos materiais pode trazer respostas mais claras na avaliação dos danos existentes, se comparada a habitual análise da velocidade de pulso. De maneira a favorecer a compreensão dos resultados obtidos, fez-se uma tabela comparativa (Tabela 3.3) dos diferentes experimentos dos autores citados.

Tabela 3.3: Resumo dos estudos realizados e dos resultados obtidos

Autores	Elemento estudado	Parâmetros avaliados	Comparação entre os parâmetros utilizados
Suaris e Fernando (1987)	Corpo de prova cilíndrico de concreto submetido à compressão axial	Vel. pulso Amplitude pico-a-pico	Velocidade de pulso praticamente constante até 90% do pico de tensão e apresentou diminuição de apenas 12% quando da ruptura. Amplitude pico-a-pico trouxe reduções muito maiores em ambas as etapas avaliadas.
Selleck et al. (1998)	Amostras de concreto submetidas ao gelo e degelo	Vel. pulso Amplitude pico-a-pico Pico freq. máx.	Demais parâmetros apresentaram redução maior do que a velocidade de pulso à medida que a amostra estava mais danificada*.
Hauwaert, Thimus e Delannay (1998)	a) Blocos cúbicos de concreto reforçado com fibras, com entalhe central aumentado gradativamente; b) Vigas de concreto reforçado com fibras submetidas à flexão	Vel. pulso Amp. máx. Energia	a) Diminuição da amplitude máxima e energia quando o entalhe atinge a extremidade inferior do “caminho” entre os transdutores. Diminuição da velocidade de pulso somente quando o entalhe ultrapassa este “caminho”. b) Velocidade de pulso sensível à microfissuração. Energia e amplitude sensíveis na micro e microfissuração.

**Tabela 3.3: Resumo dos estudos realizados e dos resultados obtidos
(Continuação)**

Hauwaert, Delannay e Thimus (1999)	Vigas de concreto reforçado com fibras em diferentes posições submetidas à flexão	Vel. pulso Energia	Energia mais sensível do que a velocidade de pulso em todos os casos.
Aggelis e Shiotani (2008)	Blocos cúbicos de argamassa com taxas de inclusão de folhas de vinil (0 a 10%), simulando danos	Vel. pulso Energia	Para a maior taxa de inclusão de “danos” (10%), a velocidade de pulso apresentou redução de apenas 10%, enquanto a energia chegou a 90% de decréscimo.
Shiotani e Aggelis (2009)		Vel. pulso Vel. grupo Amp. máx. Energia Energia acum. Freq. central	Todos os demais parâmetros foram mais sensíveis do que a velocidade de pulso.

*Autores admitem possibilidade de erro estatístico.

Assim, deu-se início a um estudo com o intuito de acrescentar informações acerca deste assunto. Para isso, procurou-se avaliar elementos distintos aos que já foram experimentados, os quais apresentassem danos com aspectos e causas reais. Desta maneira, optou-se pela avaliação de fissuras de causas distintas, contemplando desde as que geram problemas de durabilidade nas peças até as que trazem impacto na segurança da estrutura.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental constituiu-se da realização de ensaios de ultrassom em elementos de concreto e argamassa fissurados e não fissurados. Fissuras por retração plástica foram induzidas em placas de concreto e argamassa, e fissuras por flexão em vigas de concreto armado.

Procedeu-se o ensaio de ultrassom em todos estes elementos com o intuito de avaliar a sensibilidade dos parâmetros do formato da onda obtida em casos de fissuração por motivos distintos. No caso das placas, a análise foi comparativa, avaliando-se os resultados em placas fissuradas e não fissuradas. Já no caso das vigas, os parâmetros do formato da onda de ultrassom foram empregados na análise da evolução da fissuração ao longo do ensaio de flexão.

De posse dos dados obtidos, fez-se uma análise estatística classificando-se os parâmetros por ordem de confiabilidade dos resultados, utilizando o método de análise de variância (ANOVA) para cada um dos casos estudados nas placas e nas vigas. Termos espúrios dos parâmetros avaliados em todos os diferentes elementos ensaiados foram retirados considerando o Critério de Chauvenet, com intervalo de confiança de 95%.

4.1 PLACAS DE CONCRETO

Os primeiros elementos a serem produzidos foram duas placas de concreto curadas de forma diferenciada para induzir a ocorrência de fissuras por retração plástica em uma delas. Para isso foi desenvolvido um programa experimental a partir de ensaios realizados por diversos autores (KRAAI,1985; MA *et al.*, 2004; EREN e MARAR, 2010; PELISSER *et al.*, 2010). As duas placas foram confeccionadas com dimensões de 60x95x4,0 cm. As formas utilizadas foram feitas em madeira, com laterais revestidas por fita de polietileno e o fundo selado com verniz marítimo, ambos para impermeabilizar as faces, garantindo a evaporação da água somente pela superfície.

Para facilitar a ocorrência de fissuração, a restrição do movimento foi feita através de perfis metálicos em formato de “L” de 3,5x2,0x2,0 cm, com espessura de 2,65 mm. Estas foram coladas no fundo dos moldes, duas a duas, com espaçamento de 12,6 e 12,0 cm entre cada dupla, na lateral maior e menor, respectivamente, conforme pode ser visto na Figura 4.1.



Figura 4.1: Forma das placas

O concreto utilizado com traço 1:1,26:1,93 (cimento CP II-Z32, areia natural e pedrisco), relação a/c de 0,51 e alto consumo de cimento, de 450 kg/m³, foi assim produzido para favorecer a ocorrência de fissuras por retração plástica. O *slump* obtido foi de 13 cm, e em ambas as placas o adensamento do concreto foi feito em uma mesa vibratória, pelo mesmo período de tempo (5 s).

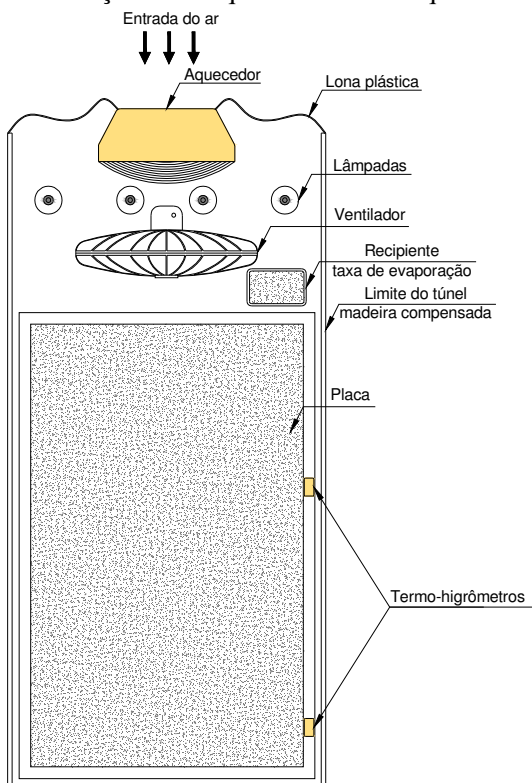
A fim de possibilitar a comparação de dados, ambas as placas foram moldadas de maneira análoga, com os mesmos tipos de materiais e formas. Somente as condições de cura foram diferenciadas, sendo que a placa onde a fissuração era desejada ficou restrita a um local com temperatura elevada e com vento.

Porém, devido à limitação dos recursos operacionais disponíveis para indução de fissuras por retração plástica nas placas, fez-se necessário limitar a espessura do elemento. Tentativas iniciais mostraram que a quantidade de calor e o vento gerados no ambiente criado para favorecer a fissuração não permitiram espessuras maiores que 40 mm, a partir da qual as placas não fissuravam.

Por este motivo, tornou-se imperativa a utilização do transdutor de 200 kHz, com diâmetro de 20 mm, que permitia a leitura nas laterais das peças, o qual exibe comprimento de onda em torno de 20 mm. Isto, por conseguinte, trouxe a necessidade de emprego de um agregado graúdo de menor dimensão máxima, a fim de que esta dimensão estivesse abaixo do comprimento de onda emitido pelo transdutor, optando-se, portanto, pelo uso do pedrisco no traço em questão.

A partir disto, a placa destinada a não conter fissuras foi curada no ambiente do laboratório, com temperatura média de 22°C e umidade relativa do ar de 65%. Manteve-se uma lâmina de água na superfície da placa nas primeiras horas para garantir a cura úmida do concreto e evitar a fissuração.

A outra placa foi submetida a condições ambientais favoráveis à retração. Para isso, ela foi alocada em um túnel em formato de “U”, de 50x70x50 cm, com 140 cm de comprimento, construído em madeira compensada. Nos fundos deste túnel colocou-se um aquecedor comum, de 2000 W de potência, com quatro lâmpadas de 250 W à sua frente e seguidas por um ventilador, com 40 cm de diâmetro e potência de 80 W, conforme mostra o esquema da Figura 4.2-a e a fotografia do ensaio na Figura 4.2-b. O fundo do túnel recebeu fechamento com lona plástica, a fim de garantir a entrada de ar apenas pela parte posterior do aquecedor, favorecendo a ventilação de ar aquecido dentro daquele ambiente.



(a)



(b)

Figura 4.2: Túnel para secagem da placa a ser fissurada - a) esquema;

b) ensaio

Os aparelhos (aquecedor, lâmpadas e ventilador) permaneceram ligados durante 4 horas após a moldagem da peça. A temperatura e umidade médias dentro do túnel nesse período variaram de acordo com a distância entre o ponto de leitura e o ventilador. Um termo-higrômetro, do tipo Hobo, da marca *Onset*, foi colocado a 40 cm do ventilador e registrou temperatura e umidade médias do ar de 50,4°C e 25,5%, enquanto outro termo-higrômetro idêntico foi posicionado mais a frente, a 80 cm, e marcou médias de 41,8°C e 35,6%. A velocidade do vento, medida através de um anemômetro de hélice, da marca *Airflow*, modelo LCA 6000, variou de acordo com o local de leitura, conforme apresentado na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Velocidades do vento

Distância do ventilador	Velocidade do vento (km/h)		
	Localização horizontal na placa		
	Esquerda	Meio	Direita
5 cm	14,5	15,9	12,6
95 cm	16,5	8,7	3,4

A taxa de evaporação de água do concreto foi medida através da sua perda de massa em um recipiente plástico de 8,5x12,3x4,0 cm também localizado dentro do túnel. Este foi pesado antes de sofrer a ação do calor e do vento, e logo após o desligamento dos aparelhos. A taxa de evaporação média de água obtida nesse período foi de 1,082 kg/m²/h.

A placa exposta a estas condições apresentou fissuração aparente, com aberturas variadas, mas em sua maioria paralelas à menor dimensão da peça. Na Figura 4.3, onde as fissuras mais visíveis estão identificadas e numeradas, é possível ver essa tendência.

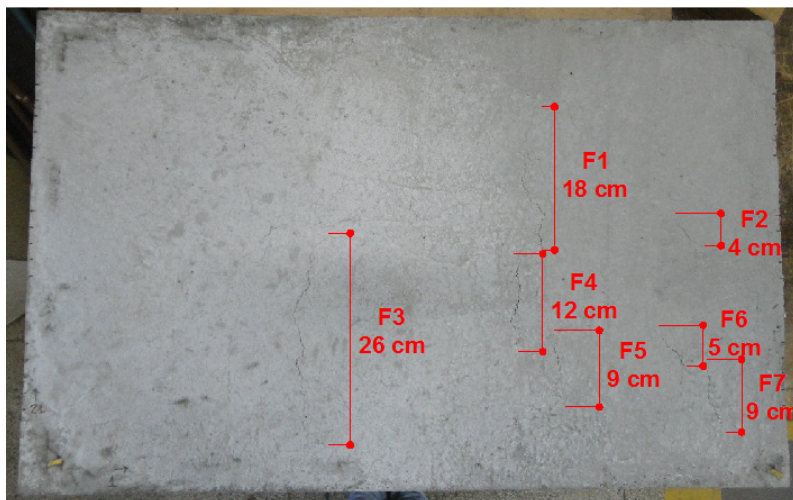


Figura 4.3: Placa de concreto fissurada por retração plástica com destaque para os comprimentos visíveis das fissuras

4.2 PLACAS DE ARGAMASSA

Como o concreto é um material heterogêneo por si só, decidiu-se por utilizar um material menos heterogêneo, como a argamassa, a fim de comparar os resultados obtidos pelo ensaio de ultrassom.

As placas foram confeccionadas com as mesmas dimensões das de concreto (60x95x4,0 cm). As formas foram impermeabilizadas e a restrição do movimento foi feito com as chapas metálicas em “L”, da mesma maneira que para as placas de concreto. O traço da argamassa foi de 1:1,5 (cimento CP II-Z32 e areia natural), relação a/c de 0,47 e consumo de cimento de 450 kg/m³.

Assim como nas placas de concreto, uma das placas de argamassa foi curada no ambiente do laboratório, desta vez com média de temperatura de 22°C e umidade relativa do ar de 40%, sem presença de vento. Uma lâmina de água foi mantida na superfície da placa nas primeiras horas para impedir a ocorrência de fissuração.

A outra placa foi alocada no mesmo túnel em forma de “U” utilizado anteriormente, conforme descrito no item 4.1. Os aparelhos permaneceram ligados durante 3 horas após a moldagem da peça. Um termo-higrômetro foi colocado a 40 cm do ventilador e registrou temperatura e umidade médias de 48,0°C e 25,7%, respectivamente, enquanto outro mais afastado, posicionado a 80 cm, marcou médias de 44,9°C e 24,0%. Como o ventilador e sua posição não variaram, as velocidades do vento foram as mesmas encontradas para a placa de concreto, citadas na Tabela 4.1.

Como já se esperava, a taxa de evaporação de água da argamassa dentro do túnel nesse período de 3 horas foi de 1,91 kg/m²/h, quase o dobro da encontrada no concreto. Isto ocorre devido a maior quantidade de água utilizada (em relação aos materiais secos), favorecendo sua evaporação. Por esse motivo, a fissuração gerada foi bem maior, com aberturas variadas, e em ambas as direções, conforme a Figura 4.4, acarretando a necessidade de desligar o túnel 1 hora antes do que foi feito para o concreto.

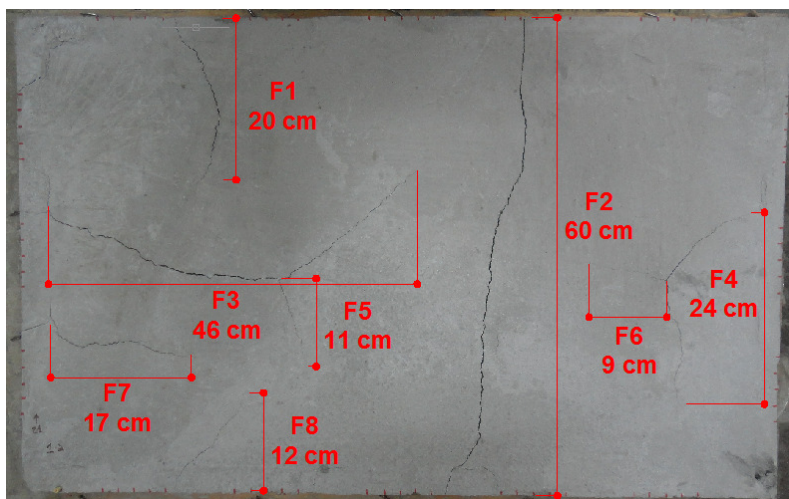


Figura 4.4: Placa de argamassa fissurada por retração plástica com destaque para os comprimentos visíveis das fissuras

4.3 VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Vigas de concreto armado com dimensões de 25x15x100 cm foram produzidas com concreto de traço de 1:1,07:1,07:2,37 (cimento

CPV ARI, areia fina natural, areia artificial e pedrisco), com consumo de cimento de 450 kg/m^3 e relação a/c de 0,52. O *slump* obtido foi em torno de 15 cm e a resistência à compressão média aos 28 dias foi 32,6 MPa.

A geometria das vigas foi escolhida a fim de garantir que, nas leituras longitudinais de ultrassom, as ondas propagassem somente pelo concreto e não percorressem a armadura utilizada (esquema de ensaio na Figura 4.9).

As vigas foram reforçadas com duas barras de armaduras longitudinais, com 8,0 mm de diâmetro, ancoradas com dobras de 10 cm em ambas as extremidades. Não foram utilizadas armaduras transversais com o intuito de diminuir interferências nos sinais do ultrassom. O cobrimento de 2,5 cm foi garantido por espaçadores plásticos, conforme mostra a Figura 4.5.

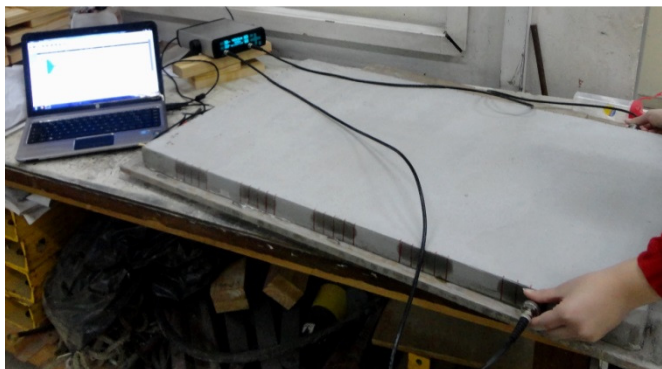


Figura 4.5: Formas e armaduras das vigas

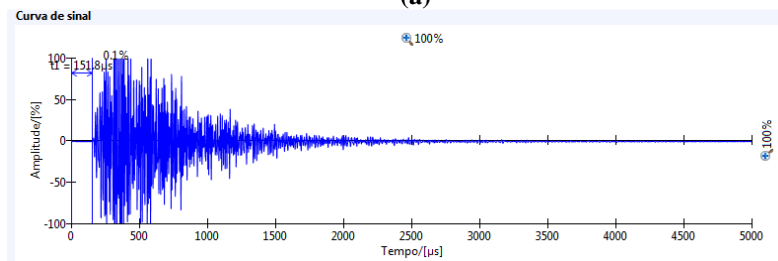
4.4 ENSAIO DE ULTRASSOM

O aparelho utilizado no presente estudo foi o *Pundit Lab*, comercializado pela *Proceq* (Figura 4.6-a). Além do tempo de chegada do pulso, o aparelho mostra o formato da onda propagada ao longo do

material, conforme pode ser visto na Figura 4.6-b. As amplitudes da onda exibidas pelo aparelho são dadas como a porcentagem da tensão de pulso utilizada, e o tempo de chegada do pulso é determinado automaticamente.



(a)



(b)

Figura 4.6: Ensaio de ultrassom - a) *Pundit Lab* em uso; b) formato da onda mostrada pelo aparelho

Este equipamento permite o ajuste dos parâmetros de uso, como amplitude de pulso, ganho no sinal recebido (amplificação) e tempo para exibição da curva. No manual do aparelho, é recomendado o uso de amplitudes e ganhos altos para aumentar a qualidade dos resultados (PROCEQ, 2013). Desta maneira, entendeu-se a necessidade de realização de alguns testes comparativos prévios, a fim de encontrar os valores a serem utilizados. A amplitude de saída do pulso foi definida como 500 V para todas as leituras (a máxima amplitude oferecida pelo equipamento), assim como o tempo de exibição da curva foi de 5 ms. Já o ganho no sinal recebido variou nos elementos estudados. No caso das placas, para que a visualização da onda fosse possível em ambas as

direções lidas, e no material são e fissurado, este ganho foi de 50 vezes. Enquanto isso, nas vigas, como o caminho percorrido pela onda seria maior e aumentaria ainda mais com a abertura de fissuras, fez-se necessário ampliar este ganho para 100 vezes.

Os transdutores utilizados foram de frequência de 200 kHz, devidamente acoplados à superfície dos elementos através de um gel condutor de marca *Plurigel*.

4.4.1 Placas

Para obtenção dos dados do ultrassom nas placas, a localização dos pontos de leitura foi escolhida a fim de desviar dos perfis metálicos em “L”, sendo dispostos conforme a Figura 4.7. Nas leituras de 1 a 20 o caminho percorrido pela onda é paralelo à menor dimensão da placa de concreto, enquanto que nas leituras de 21 a 32, à maior.

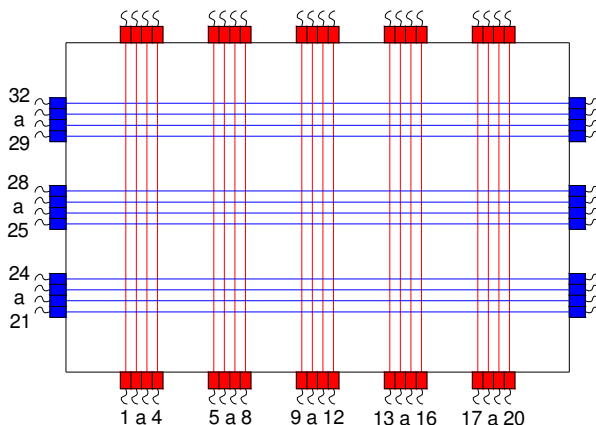


Figura 4.7: Disposição dos pontos de leitura do ultrassom

Nas placas de argamassa, apenas as leituras de 1 a 20 foram realizadas. O motivo disto foi à ocorrência de uma fissura de grande porte paralela à menor dimensão da placa, (F2 na Figura 4.4) fazendo com que a maioria dos pontos de leitura que cortavam essa fissura, de 21 a 32, apresentasse valor de tempo nulo ou muito variado em um mesmo ponto. Isto se deve ao fato da onda não conseguir passar por essa abertura em alguns locais e, em outros, encontrar caminhos variados, dependendo do acoplamento entre os agregados que estão encostados uns aos outros nesta fissura.

Os transdutores foram locados verticalmente no extremo superior da lateral da placa em cada leitura, como ilustrado na Figura 4.8. Como já exposto anteriormente, a limitação dos recursos disponíveis para favorecer a fissuração por retração plástica fez com que fosse necessário fixar a altura da placa a 4,0 cm. Com isso, não pode ser respeitada a distância mínima do comprimento da onda (20 mm, neste caso) entre o transdutor e a borda. Porém, como todas as leituras foram realizadas nesta mesma posição e a análise feita foi comparativa, o efeito de borda esteve presente em todos os resultados do ultrassom, e no presente estudo, este efeito foi assumido como constante. Porém, sugere-se a avaliação da influência deste efeito em trabalhos futuros, para verificação se o mesmo é ou não constante quando a onda percorre materiais de diferentes extensões.

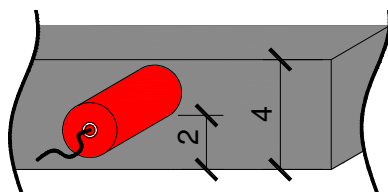


Figura 4.8: Detalhe da localização vertical dos transdutores (dimensões em centímetros)

Realizou-se o ensaio de ultrassom aos 30 dias após a moldagem das placas, onde foram obtidas de 7 a 12 leituras em cada ponto no concreto, e de 8 a 10 na argamassa.

4.4.2 Vigas

No ensaio de ultrassom realizado nas vigas de concreto armado, estas foram submetidas a esforços de flexão a quatro pontos. A carga foi aplicada por meio de uma prensa hidráulica marca *Mohr e Federhaff AG* com capacidade de 200 kN e lida por uma célula de carga, marca *Kratos*, de capacidade 50 kN, ligada a um microcomputador por meio de um sistema de aquisição de dados, *HBM/Spider 8* com 4 canais (programa: *Catman 4.0*). O esquema de ensaio é mostrado na Figura 4.9.

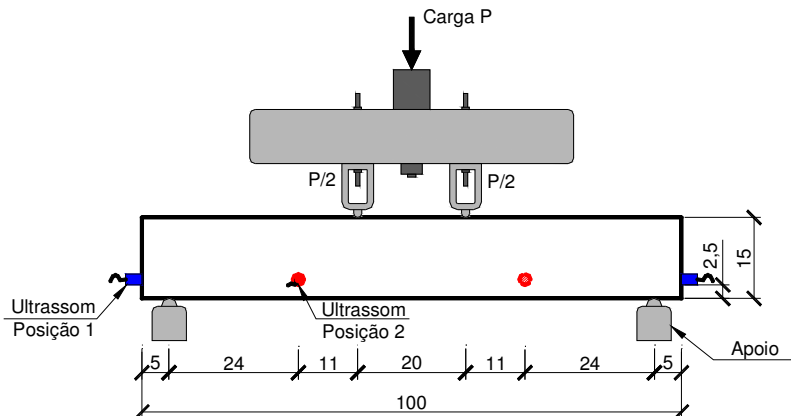


Figura 4.9: Esquema de ensaio das vigas submetidas a esforços de flexão (dimensões em centímetros)

Dois posições de leitura de ultrassom foram definidas, conforme também indicado na Figura 4.9. As leituras na posição 1 foram diretas, paralelas ao comprimento da viga. Já na posição 2 estas foram indiretas, passando pela local onde se esperava que ocorresse maior fissuração devido ao tipo de ruptura desejada.

As leituras nas duas posições foram realizadas em 7 estágios: o primeiro nas vigas antes de serem ensaiadas, ainda descarregadas; os quatro próximos após o início do ensaio de flexão, a cada incremento de carga de aproximadamente 11 kN, até chegar à ruptura, que ocorreu em torno de 50 kN; o sexto após o rompimento dos elementos, mas sem a retirada da carga atuante; e o sétimo nas vigas já rompidas e descarregadas. Em cada um dos estágios, em ambas as posições, foram realizadas de 10 a 12 leituras, a fim de garantir um considerável número de amostras para amenizar possíveis problemas com a variabilidade dos resultados dos novos parâmetros.

As quatro leituras feitas ao longo das adições de carga no ensaio de flexão foram realizadas a partir do seguinte procedimento: atingido o nível de carregamento esperado, cessava-se o acréscimo de carga oferecido pela prensa, mantinha-se a carga atingida e o ultrassom era utilizado em ambas as posições.

À medida que se interrompia a adição de carga para realização da leitura, o carregamento oferecido pela prensa hidráulica decrescia lentamente. Portanto, durante a leitura de ultrassom, havia uma variação

entre a carga atingida e a existente no final da leitura. Esta variação foi muito pequena nos estágios de carga anteriores à ruptura. Nas leituras após a ruptura, esta variação foi bem maior, como mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Cargas de leitura (kN)

Leitura	Carga Viga 1			Carga Viga 2			Carga Viga 3		
	Máx.*	Final	Média	Máx.*	Final	Média	Máx.*	Final	Média
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	11,82	11,06	11,44	11,45	10,60	11,02	11,45	10,98	11,21
3	23,44	21,61	22,52	22,19	21,83	22,01	22,25	21,25	21,75
4	34,52	31,95	33,23	33,70	32,25	32,97	33,85	31,64	32,74
5	44,54	43,42	43,98	45,10	43,54	44,32	44,48	42,68	43,58
6	Não realizada			49,85	33,14	41,49	48,59	28,04	38,31
7	0**	0**	0**	0**	0**	0**	0**	0**	0**

*Carga atingida **Após a ruptura da viga - descarregada

Esta variação era esperada, devido ao tipo de prensa utilizado. Tendo em vista que a maior variação ocorreu após a ruptura das vigas, estágio em que a utilidade do elemento foi perdida, não há influência negativa no ensaio de ultrassom. Estas leituras pós-ruptura foram realizadas para avaliação completa do ensaio de flexão em laboratório, mas que não teriam função na prática de inspeções. Assim, os resultados das leituras 6 e 7 serão apresentados no Apêndice A, a título de informação, mas não serão analisados ao longo da dissertação.

Utilizando a resistência média obtida, 32,6 MPa, a carga esperada para causar o momento de fissuração era de 17,22 kN, conforme a Equação (2.2). Assim, de acordo com a Tabela 4.2, a onda de ultrassom se propagaria pelas primeiras fissuras somente a partir da leitura 3.

4.4.3 Processamento dos dados e parâmetros utilizados

A onda gerada pelo equipamento de ultrassom utilizado pode ser transformada em coordenadas “x” e “y”, de tempo e amplitude (porcentagem da amplitude de saída), em uma planilha eletrônica. Foram esses dados que permitiram encontrar e analisar os parâmetros da onda de maneira mais automatizada, possibilitando um futuro emprego prático mais plausível, ou até o desenvolvimento de programa computacional para tal.

A amplitude pico-a-pico, avaliada por alguns pesquisadores, não foi utilizada nesta pesquisa. O motivo está no formato da onda obtido nas placas de concreto. Nelas, as duas amplitudes iniciais (positiva e negativa) são muito pequenas, mesmo no material são, diferentemente do observado nos estudos revisados. O aumento destas amplitudes através da utilização de um maior ganho de sinal traria o aumento das demais amplitudes ao longo da onda. No entanto, como estas são adquiridas em porcentagem do pulso emitido, todas as ondas obtidas, inclusive as de material fissurado, apresentariam as mesmas amplitudes máximas, pois estas chegariam à porcentagem máxima do pulso gerado. Assim, preferiu-se utilizar os outros parâmetros de energia e garantir a possibilidade de análise do parâmetro amplitude máxima neste estudo.

Os parâmetros utilizados em todos os elementos foram os mesmos: velocidade de pulso, velocidade de grupo, amplitude máxima, energia, energia acumulada, magnitude e pico de frequência máxima, e frequência central.

A energia foi calculada em duas envoltórias de tempo, uma entre 0 e 1600 μ s, aqui chamada de energia total, e outra entre 0 e 500 μ s, denominada energia inicial. A primeira considerando toda a parte significativa da onda e a segunda a fim de encontrar a energia referente à parte mais expressiva da onda, nos tempos iniciais, onde as amplitudes mostravam-se maiores. Em todos os demais parâmetros, ao invés de utilizar o tempo total de exibição da onda (5ms), criou-se também uma envoltória entre os tempos 0 e 1600 μ s. Esta foi definida com o intuito de diminuir a quantidade de dados, e conseqüentemente, o tempo de processamento dos mesmos. Além disso, a onda gerada em tempos maiores aos da envoltória, mostrou excessiva atenuação.

Calculou-se a velocidade de pulso através da Equação (3.8) e a energia total pela Equação (3.11).

A velocidade de grupo (V_g) foi calculada utilizando a Equação (4.1):

$$V_g = \frac{L}{t_{am}} \quad (4.1)$$

onde:

L = distância entre o transdutor emissor e o receptor;

t_{am} = tempo registrado para amplitude máxima da onda.

Observa-se que, em diversos casos, especialmente nos materiais sem fissuras, uma mesma onda apresentou mais do que um pico de

amplitude, devido ao truncamento de dados ocorrido pela amplificação realizada. Quando isso aconteceu, foi utilizado o primeiro destes picos de amplitude para o cálculo da velocidade de grupo, como identificado na Figura 4.10.

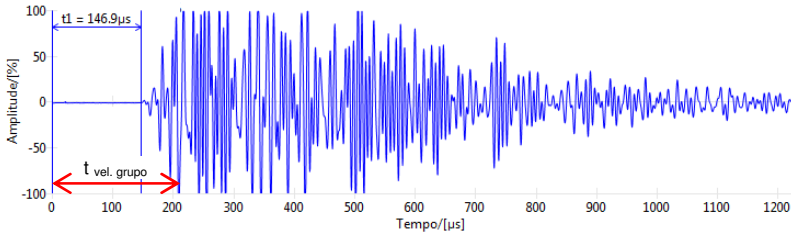


Figura 4.10: Onda apresentando diversos picos de amplitude

Este truncamento fez com que se utilizassem resultados de energia conservadores, pois a “área” da onda não considerada em materiais sem danos aumentaria o valor da energia nestes casos. Logo, a diferença esperada entre um material são e um danificado seria ainda maior.

Os parâmetros de magnitude e pico de frequência máxima e frequência central foram obtidos através dos espectros de frequência gerados pela Transformada Rápida de Fourier (FFT) a partir dos dados no domínio do tempo. Inicialmente, nas placas, utilizaram-se informações inseridas dentro da envoltória de tempo de 0 a 1600 μs para obtenção deste espectro. Com o intuito de melhorar a análise no domínio da frequência, diminuindo a possível influência de ruídos, nas vigas, mais três envoltórias de tempo foram avaliadas: de 0 a 500 μs , do tempo de chegada do pulso a 1600 μs e do tempo de chegada do pulso a 500 μs .

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados as ondas obtidas e os resultados de todos os parâmetros utilizados para as duas direções das placas de concreto, para a única direção lida nas placas de argamassa e para as duas posições de leitura das vigas de concreto armado.

5.1 PLACAS

Nas placas de concreto e argamassa, considerando a quantidade de leituras realizada em cada ponto definido, obteve-se um total de aproximadamente 1000 formatos de onda gerados, e assim, 1000 resultados para cada um dos oito parâmetros avaliados. Em cada um dos pontos de leitura, diante da grande quantidade de dados, fez-se uma análise estatística de maneira a retirar os valores excessivamente dispersos em cada um dos parâmetros e após isso, calculou-se a média dos parâmetros estudados por ponto de leitura. Toda avaliação subsequente nas placas foi realizada utilizando-se, portanto, este valor médio em cada ponto.

A variabilidade dos resultados do formato da onda ocorre, em especial, devido ao acoplamento, que mantido de forma manual, está sujeito a variações.

De forma a descrever o comportamento da totalidade das placas relativo à fissuração, e considerando que, dado a natureza aleatória das fissuras, nem todos os pontos de leitura nas placas fissuradas cruzavam estas fissuras, procedeu-se ao cálculo da média e desvio padrão dos parâmetros do formato da onda entre todos os pontos de leitura em uma mesma direção de cada placa.

Como as fissuras na placa de concreto ocorreram essencialmente paralelas à menor dimensão, 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, todas 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.

5.1.1 Formato de onda

Para exemplificar os formatos de onda obtidos em todos os pontos de leitura, apresentam-se a seguir formatos característicos em

alguns pontos de leitura nas placas de concreto e argamassa, fissuradas e não fissuradas.

As Figuras 5.1-a e 5.1-b apresentam os formatos de onda obtidos em uma leitura do ponto 17 (paralela a menor dimensão) nas placas de concreto não fissurada e fissurada, respectivamente.

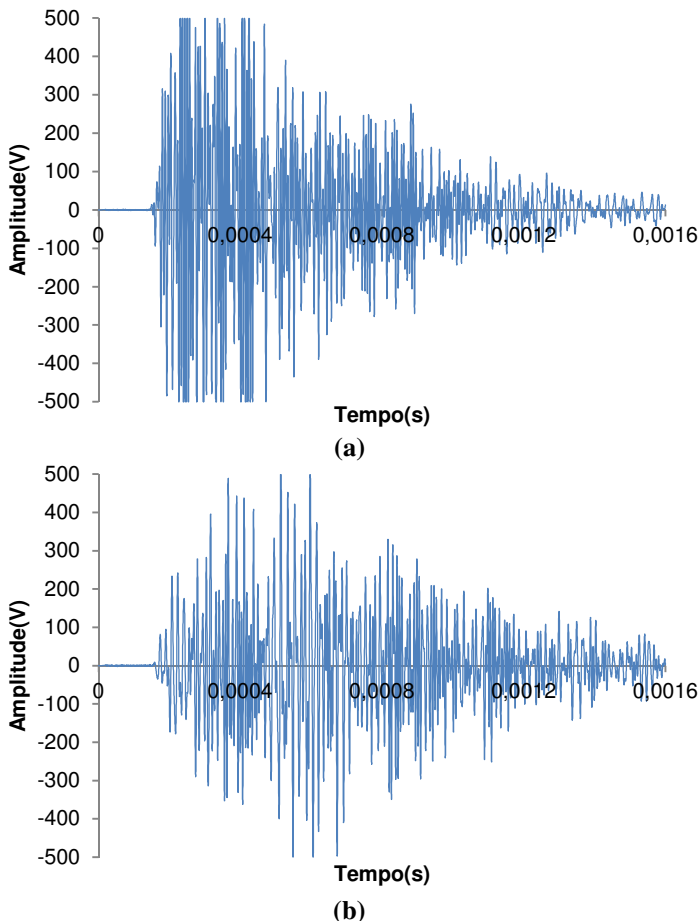


Figura 5.1: Formato de onda obtida pelo ultrassom no ponto 17- a) Concreto não fissurado; b) Concreto fissurado

Nas Figuras 5.2-a e 5.2-b são exibidas ondas que se propagam paralelas à maior dimensão (leitura do ponto 23), no material são e fissurado, respectivamente.

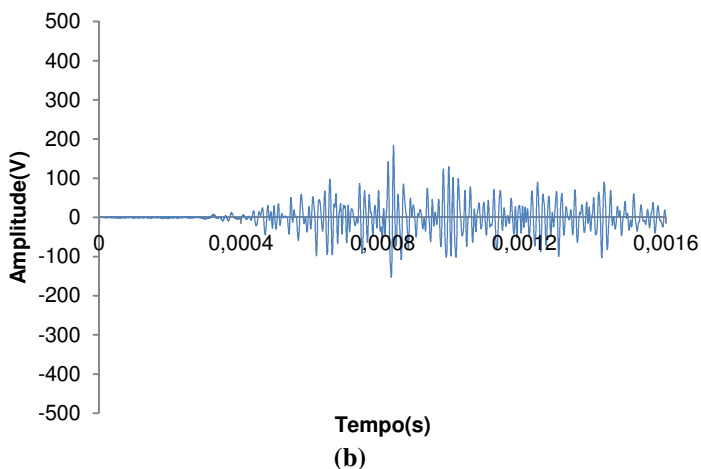
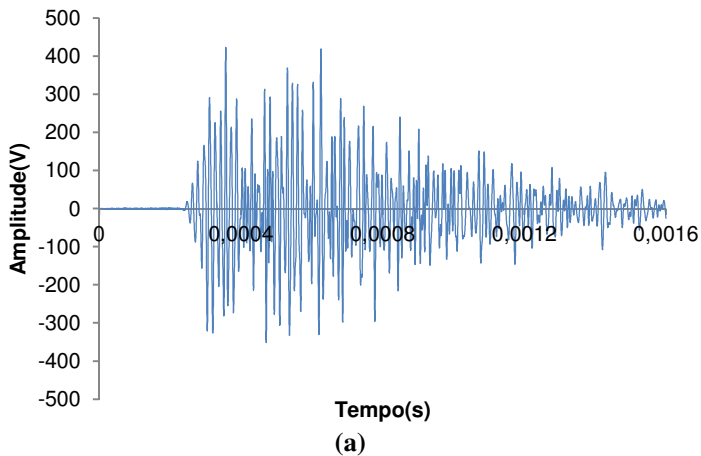


Figura 5.2: Formato de onda obtida pelo ultrassom no ponto 23 - a) Concreto não fissurado; b) Concreto fissurado

Por fim, as Figuras 5.3-a e 5.3-b apresentam ondas obtidas nas placas de argamassa, na leitura do ponto 4, no material são e fissurado, respectivamente.

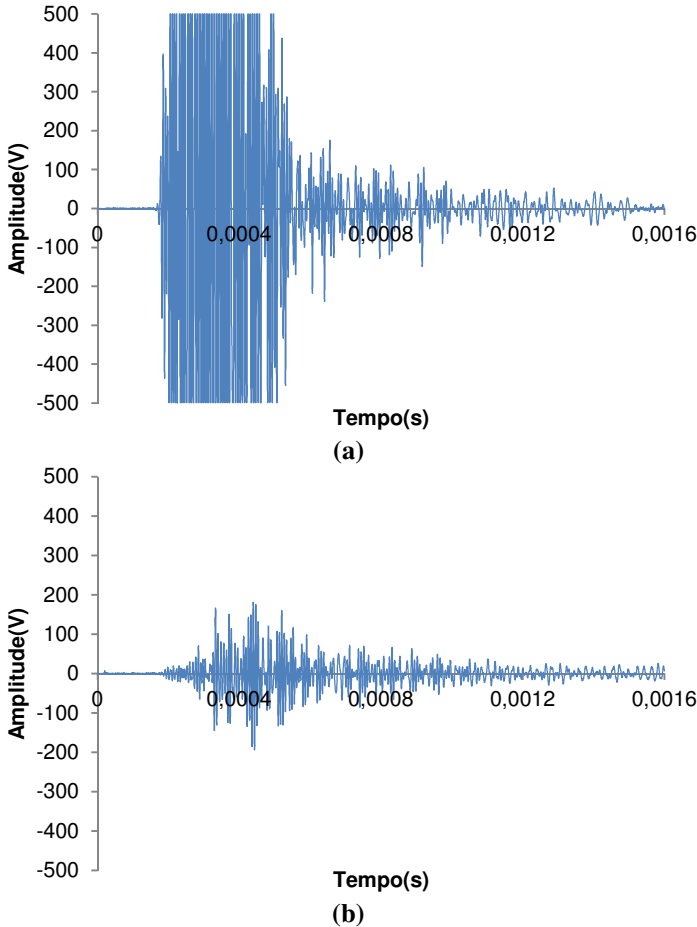


Figura 5.3: Formato de onda obtida pelo ultrassom no ponto 4 - a) Argamassa não fissurada; b) Argamassa fissurada

Percebe-se o potencial da análise do formato da onda pela simples exibição de como ocorre a propagação em materiais sãos e em danificados.

O formato da onda nos materiais fissurados apresentou grande variabilidade, devido à aleatoriedade das fissuras. Assim, para esta visualização do formato da onda, foi escolhido um ponto onde havia cruzamento de fissura, e foi também exibido seu correspondente na placa sã.

5.1.2 Velocidade de pulso e de grupo

Os resultados médios obtidos de velocidade de pulso e de grupo (obtidos de acordo com o item 4.4.3), bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, para as leituras de 1 a 20 na placa de concreto, de 21 a 32 na mesma placa, e para a de argamassa, respectivamente.

Tabela 5.1: Velocidade de pulso e de grupo nas placas de concreto (leituras de 1 a 20)

	Velocidade do pulso (m/s)	Velocidade de grupo (m/s)
Concreto não fissurado (1-20)	4108	2777
Desvio padrão (DP)	25,6	291,1
Coefficiente de Variação (CV-%)	0,6	10,5
Concreto fissurado (1-20)	3902	1651
Desvio padrão (DP)	56,7	312,5
Coefficiente de Variação (CV-%)	1,5	18,9

Tabela 5.2: Velocidade de pulso e de grupo nas placas de concreto (leituras de 21 a 32)

	Velocidade do pulso (m/s)	Velocidade de grupo (m/s)
Concreto não fissurado (21-32)	3890	1866
Desvio padrão (DP)	8,8	280,0
Coefficiente de Variação (CV-%)	0,2	14,8
Concreto fissurado (21-32)	3200	1385
Desvio padrão (DP)	285,5	294,4
Coefficiente de Variação (CV-%)	8,9	21,3

Tabela 5.3: Velocidade de pulso e de grupo nas placas de argamassa

	Velocidade do pulso (m/s)	Velocidade de grupo (m/s)
Argamassa não fissurada	3598	2892
Desvio padrão (DP)	41,2	211,2
Coefficiente de Variação (CV-%)	1,1	7,3
Argamassa fissurada	3213	1653
Desvio padrão (DP)	505,2	515,3
Coefficiente de Variação (CV-%)	15,7	31,2

5.1.3 Energia e amplitude máxima

Os resultados médios obtidos pelos parâmetros de energia (inicial, aos 500 μ s, e total, aos 1600 μ s, conforme descrito no item 4.4.3) e amplitude máxima, juntamente com o desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6.

Tabela 5.4: Parâmetros de energia nas placas de concreto (1 a 20)

	Amplitude máxima (V)	Energia Inicial (V. μ s)	Energia total (V. μ s)
Concreto não fissurado (1-20)	496,8	0,0776	0,1510
Desvio padrão (DP)	13,8	0,0141	0,0277
Coeficiente de Variação (CV-%)	2,8	18,1	18,4
Concreto fissurado (1-20)	491,0	0,0536	0,1393
Desvio padrão (DP)	31,8	0,0127	0,0261
Coeficiente de Variação (CV-%)	6,5	23,6	18,7

Tabela 5.5: Parâmetros de energia nas placas de concreto (21 a 32)

	Amplitude máxima (V)	Energia Inicial (V. μ s)	Energia total (V. μ s)
Concreto não fissurado (21-32)	332,9	0,0198	0,0723
Desvio padrão (DP)	54,6	0,0041	0,0098
Coeficiente de Variação (CV-%)	16,4	20,7	13,6
Concreto fissurado (21-32)	119,3	0,0027	0,0297
Desvio padrão (DP)	45,6	0,0019	0,0122
Coeficiente de Variação (CV-%)	38,2	72,1	41,2

Tabela 5.6: Parâmetros de energia nas placas de argamassa

	Amplitude máxima (V)	Energia Inicial (V. μ s)	Energia total (V. μ s)
Argamassa não fissurada	497,0	0,0924	0,1277
Desvio padrão (DP)	12,9	0,0179	0,0224
Coeficiente de Variação (CV-%)	2,6	19,4	17,5
Argamassa fissurada	328,2	0,0294	0,0605
Desvio padrão (DP)	165,7	0,0256	0,0455
Coeficiente de Variação (CV-%)	50,5	87,2	75,2

5.1.4 Magnitude e pico de frequência máxima e frequência central

Os gráficos resultantes no domínio da frequência, a partir da Transformada Rápida de Fourier (obtidos de acordo com o item 4.4.3), para os mesmos pontos (17, 23 e 4, respectivamente) já apresentados no domínio do tempo, são exibidos na Figura 5.4.

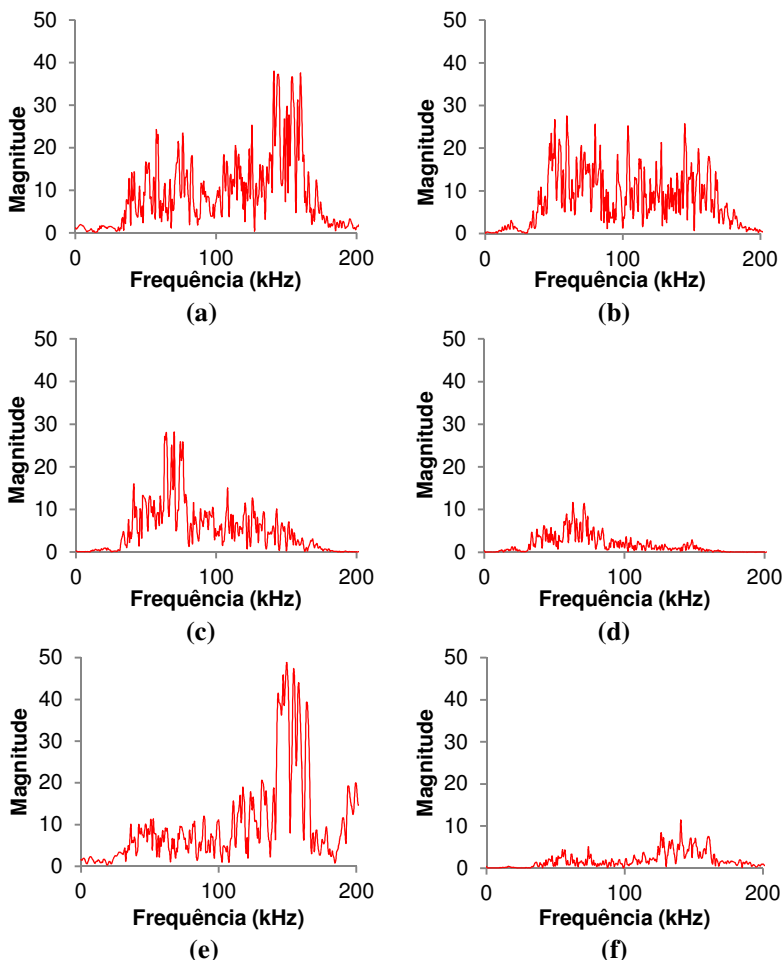


Figura 5.4: Espectro de frequências - a) Concreto não fissurado (17); b) Concreto fissurado (17); c) Concreto não fissurado (23); d) Concreto fissurado (23); e) Argamassa não fissurada (4); f) Argamassa fissurada (4)

Os valores médios encontrados pelos parâmetros de frequência, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação, são apresentados nas Tabelas 5.7, 5.8 e 5.9.

Tabela 5.7: Parâmetros de frequência nas placas de concreto (1 a 20)

	Pico de frequência máxima (kHz)	Magnitude da frequência máxima	Frequência central (kHz)
Concreto não fissurado (1-20)	144,3	44,3	108,8
Desvio padrão (DP)	16,3	9,4	3,5
Coeficiente de Variação (CV-%)	11,3	21,3	3,2
Concreto fissurado (1-20)	133,2	36,1	108,4
Desvio padrão (DP)	20,6	8,4	3,8
Coeficiente de Variação (CV-%)	15,5	23,2	3,5

Tabela 5.8: Parâmetros de frequência nas placas de concreto (21 a 32)

	Pico de frequência máxima (kHz)	Magnitude da frequência máxima	Frequência central (kHz)
Concreto não fissurado (21-32)	64,2	21,7	89,4
Desvio padrão (DP)	5,0	3,4	2,8
Coeficiente de Variação (CV-%)	7,7	15,6	3,1
Concreto fissurado (21-32)	65,6	9,1	79,2
Desvio padrão (DP)	9,1	4,0	2,1
Coeficiente de Variação (CV-%)	13,9	43,6	2,7

Tabela 5.9: Parâmetros de frequência nas placas de argamassa

	Pico de frequência máxima (kHz)	Magnitude da frequência máxima	Frequência central (kHz)
Argamassa não fissurada	147,9	53,8	127,6
Desvio padrão (DP)	3,2	12,2	2,1
Coeficiente de Variação (CV-%)	2,2	22,7	1,7
Argamassa fissurada	163,6	21,4	119,9
Desvio padrão (DP)	58,9	14,6	5,5
Coeficiente de Variação (CV-%)	36,0	68,0	4,6

5.1.5 Energia acumulada

Para obtenção da energia acumulada foi necessário produzir um gráfico para cada leitura em cada ponto, sendo assim, devido ao elevado número de leituras realizadas em um mesmo ponto, utilizou-se um processo simplificado. A fim de possibilitar a comparação dos resultados de energia acumulada entre os pontos de leitura de maneira mais clara, apenas uma curva foi escolhida aleatoriamente para cada ponto lido. Isto foi possível devido a pouca variação entre elas num dado ponto de leitura, como pode ser visto na Figura 5.5, em uma das leituras onde todos os dados estão presentes.

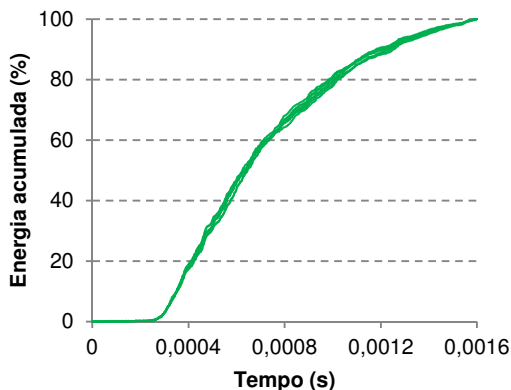


Figura 5.5: Energia acumulada - todas as curvas obtidas no ponto 24 da placa de concreto não fissurada

A partir disto, optou-se por colocar em um mesmo gráfico estas curvas elegidas de cada ponto, tanto das amostras fissuradas como das sem fissuras. Nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 estão os resultados da placa de concreto nas leituras de 1 a 20, 21 a 32 e da placa de argamassa, respectivamente.

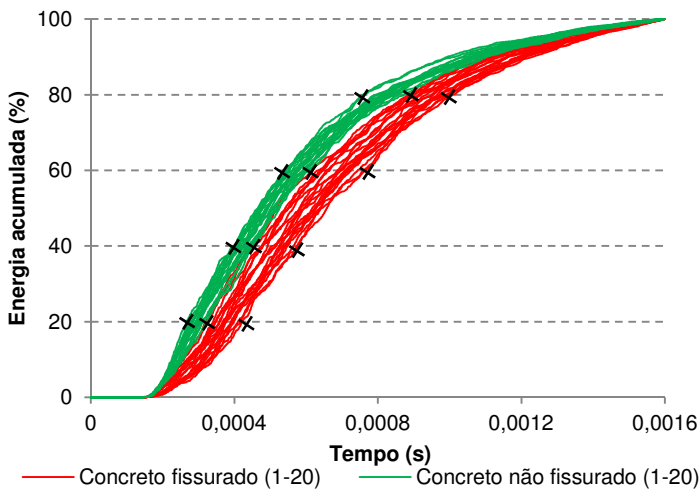


Figura 5.6: Energia acumulada nas placas de concreto (1-20)

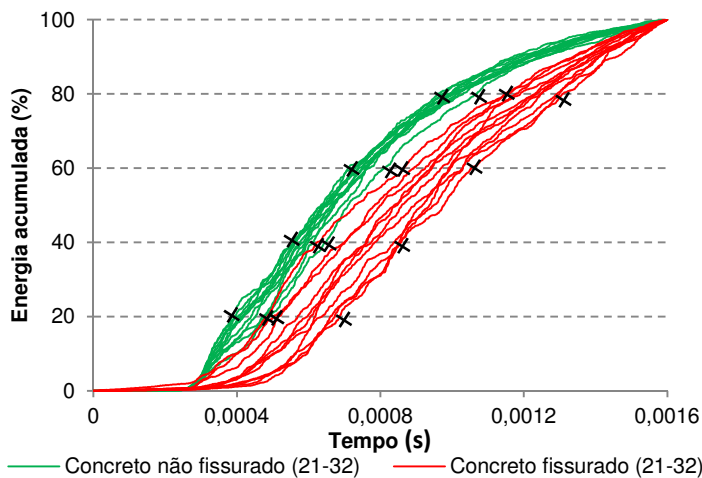


Figura 5.7: Energia acumulada nas placas de concreto (21-32)

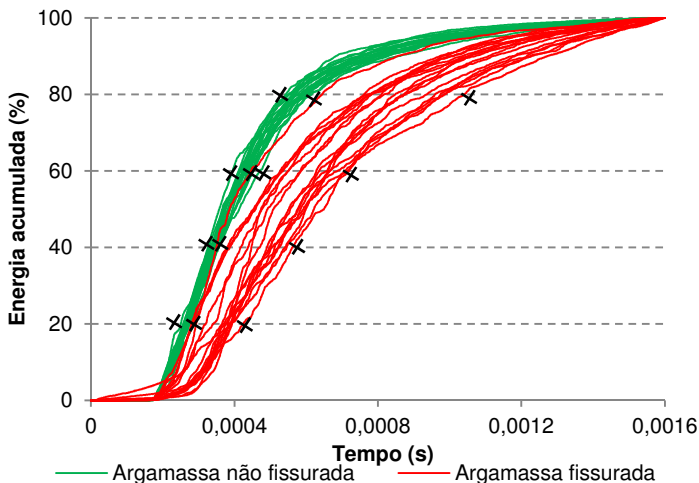
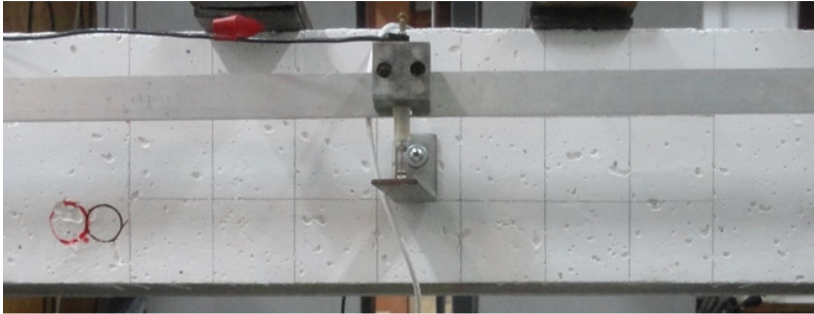


Figura 5.8: Energia acumulada nas placas de argamassa

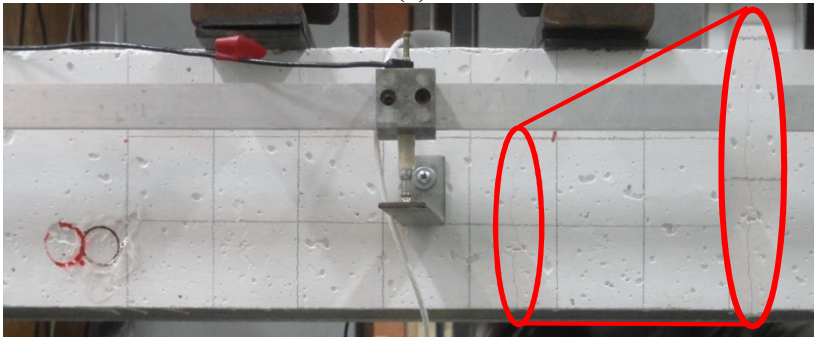
A fim de quantificar o atraso ocorrido na chegada da energia acumulada da onda na amostra fissurada, utilizaram-se os tempos limites, máximo e mínimo, das regiões delimitadas pelas curvas do material fissurado e não fissurado. Como porcentagem de análise, foram fixados os pontos de 20%, 40%, 60% e 80% da energia da onda. Definido isto, extraiu-se os tempos limítrofes da curva, demarcados com um “x” nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8, os quais são correspondentes a estes pontos. Nota-se que, em todas as figuras, o tempo limite máximo da curva não fissurada de cada porcentagem é praticamente o mesmo que o mínimo da curva fissurada.

5.2 VIGAS

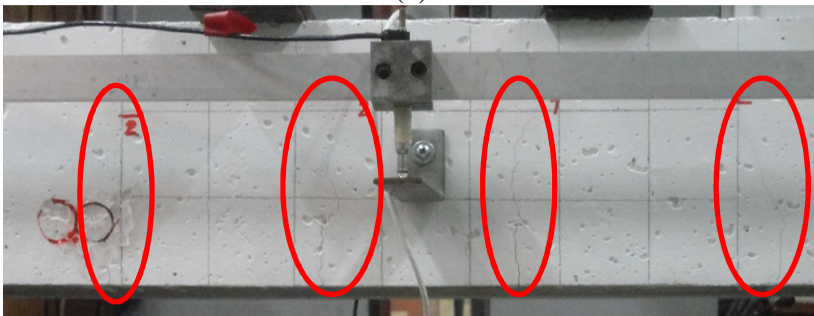
Com relação à fissuração das vigas durante os ensaios, apresentam-se na Figura 5.9 fotografias realizadas durante os vários estágios de carga, onde podem ser visualizados o surgimento e desenvolvimento das fissuras. Destacam-se em vermelho, as primeiras fissuras que surgiram. O quadriculado desenhado no centro das vigas possui dimensão de 5,0x5,0 cm e tem o intuito de facilitar a visualização da extensão das fissuras. As fotografias correspondentes às demais vigas estão presentes no Apêndice A.



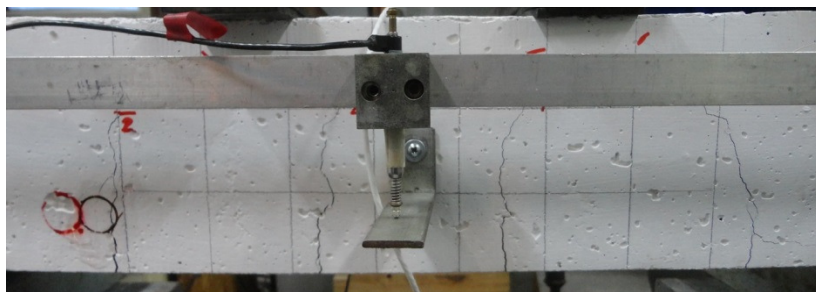
(a)



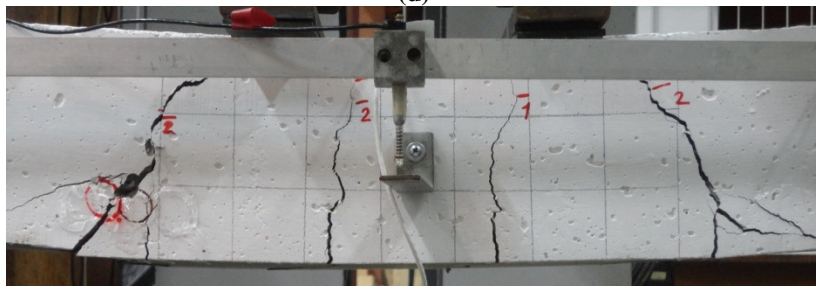
(b)



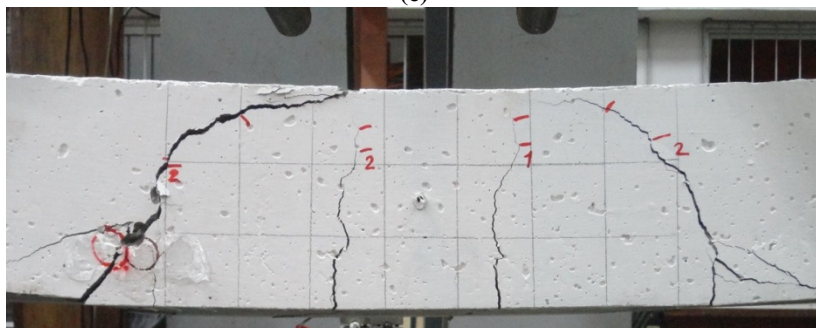
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.9: Manifestação de fissuras ao longo do carregamento na viga 2 - a) Leitura 1 e 2; b) Leitura 3; c) Leitura 4; d) Leitura 5; e) Leitura 6; f) Leitura 7

A marcação feita com um traço nomeado “1” e “2” correspondem, respectivamente, à leitura 3, onde ocorreram as primeiras fissuras, e à leitura 4. Os traços acima destas demarcações são relativos ao aumento de determinada fissura em leituras posteriores.

Percebeu-se que, em todas as vigas, a fissuração iniciou no centro do elemento, dentro da área esperada para a ruptura à flexão.

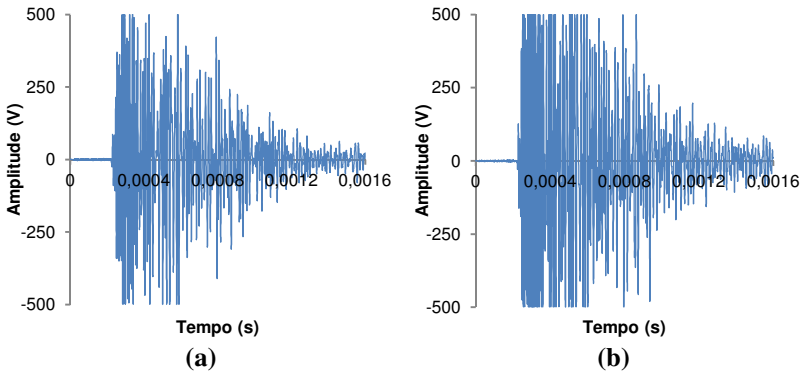
Porém, com o aumento do carregamento, algumas fissuras começaram a surgir ou a se propagar em direção aos apoios, característica de esforços cortantes excessivos. Por fim, a ruptura, em todos os casos, deu-se de maneira mista, com fissuras de propriedades de cisalhamento e flexão.

Justifica-se este tipo de ruptura pela inexistência de armadura transversal, que contribuiria para a resistência ao cisalhamento. Como já mencionado, esta não foi utilizada a fim de diminuir interferências nos sinais do ultrassom. Contudo, a ruptura mista não foi prejudicial para a análise realizada.

Assim como nas placas, nas vigas também fez-se a análise estatística para retirada dos termos espúrios entre as leituras, que variaram de 10 a 12 em ambas as posições definidas. Foram obtidos em torno de 500 formatos de onda, e em cada uma das duas posições de leitura, nos diferentes estágios de carga, calcularam-se as médias e desvios padrão de todos os parâmetros, os quais serão apresentados a seguir.

5.2.1 Formato de onda

Os formatos de onda obtidos nas diferentes leituras da viga 2, na posição 1 e 2 são exibidos nas Figuras 5.10 e 5.11, respectivamente.



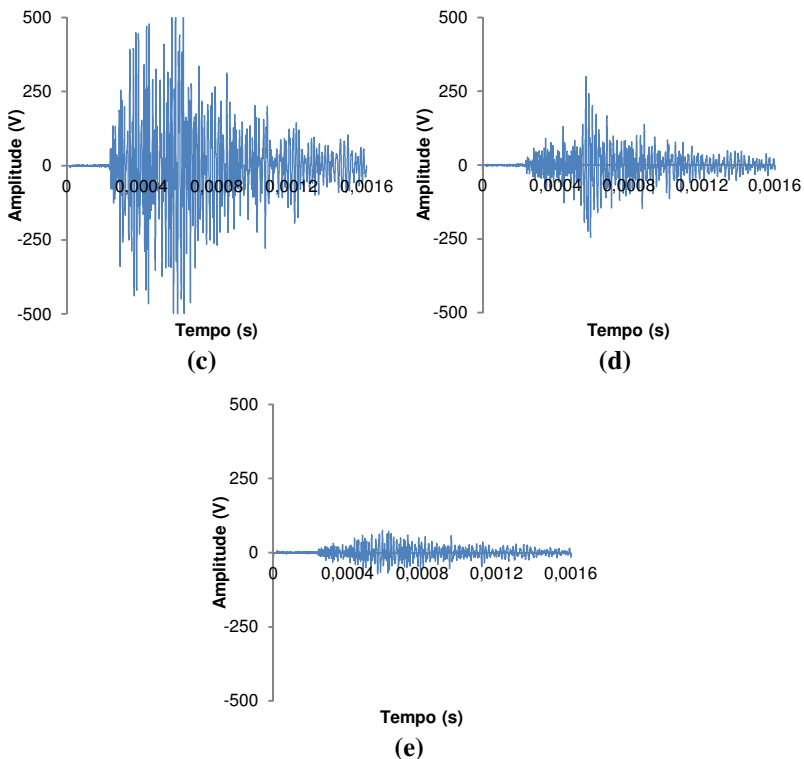
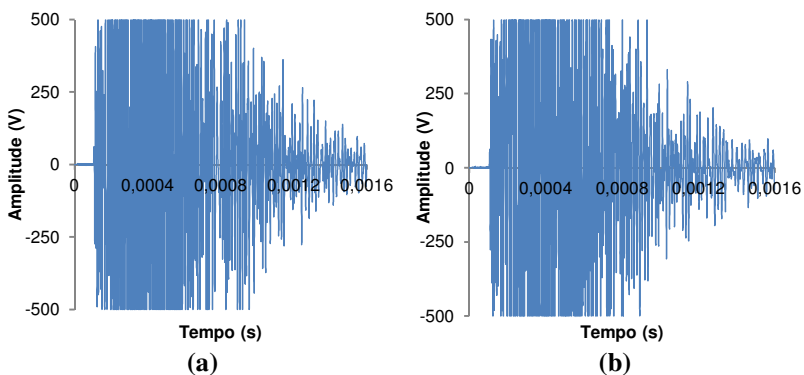


Figura 5.10: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 2- Posição 1 - a) Leitura 1; b) Leitura 2; c) Leitura 3; d) Leitura 4; e) Leitura 5



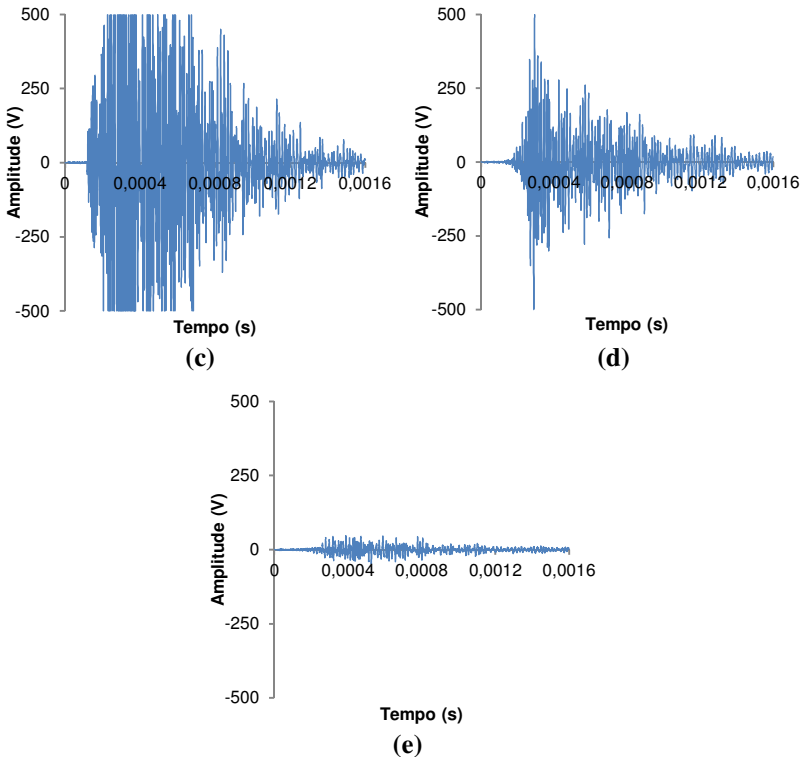


Figura 5.11: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 2- Posição 2 - a) Leitura 1; b) Leitura 2; c) Leitura 3; d) Leitura 4; e) Leitura 5

Novamente, os formatos de onda demonstraram sua sensibilidade em relação à manifestação e aumento das fissuras. Percebe-se que, em ambas as posições lidas, as amplitudes da onda apresentam redução a partir da terceira leitura (Figura 5.9-c e 5.11-c), onde já era visível a existência de fissuras. As ondas das leituras posteriores, 4 e 5, refletem o aumento da fissuração existente, onde as amplitudes atenuam-se cada vez mais.

A tendência de alteração dos formatos de onda ao longo de todas as leituras se repete nas demais vigas. Os resultados das vigas 1 e 3 estão apresentados no Apêndice A.

5.2.2 Velocidade de pulso e de grupo

Os resultados médios obtidos de velocidade de pulso e de grupo em cada uma das leituras, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação são exibidos nas Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12, para as vigas 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 5.10: Velocidade de pulso e de grupo na viga 1

	Velocidade de pulso (m/s)		Velocidade de grupo (m/s)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	4452	4462	3536	4090
Desvio padrão	1,9	101,1	44,8	10,8
Coeficiente de Variação (%)	0,0	2,3	1,3	0,3
Leitura 2	4446	4390	4281	4079
Desvio padrão	1,5	8,7	3,5	10,6
Coeficiente de Variação (%)	0,0	0,2	0,1	0,3
Leitura 3	4250	3125	1688	2077
Desvio padrão	1,0	86,8	0,0	2,2
Coeficiente de Variação (%)	0,0	2,8	0,0	0,1
Leitura 4	3606	3271	1729	1664
Desvio padrão	32,0	28,9	85,2	136,7
Coeficiente de Variação (%)	0,9	0,9	4,9	8,2
Leitura 5	3461	2673	1753	1587
Desvio padrão	0,6	139,2	133,2	251,9
Coeficiente de Variação (%)	0,0	5,2	7,6	15,9

Tabela 5.11: Velocidade de pulso e de grupo na viga 2

	Velocidade de pulso (m/s)		Velocidade de grupo (m/s)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	4409	4575	3527	3369
Desvio padrão	2,9	16,6	70,2	456,4
Coeficiente de Variação (%)	0,1	0,4	2,0	13,5
Leitura 2	4403	4566	3963	3825
Desvio padrão	1,4	15,6	61,4	7,5
Coeficiente de Variação (%)	0,0	0,3	1,5	0,2
Leitura 3	4321	4072	2093	2372
Desvio padrão	2,8	7,7	270,3	76,5
Coeficiente de Variação (%)	0,1	0,2	12,9	3,2
Leitura 4	3590	2453	1768	1612
Desvio padrão	1,9	16,7	3,8	2,4
Coeficiente de Variação (%)	0,1	0,7	0,2	0,1
Leitura 5	2208	1704	1744	1077
Desvio padrão	85,4	1,4	170,4	308,3
Coeficiente de Variação (%)	3,9	0,1	9,8	28,6

Tabela 5.12: Velocidade de pulso e de grupo na viga 3

	Velocidade de pulso (m/s)		Velocidade de grupo (m/s)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	4431	4322	2539	2795
Desvio padrão	0,9	7,5	679,9	73,0
Coeficiente de Variação (%)	0,0	0,2	26,8	2,6
Leitura 2	4428	4312	3470	3129
Desvio padrão	1,0	5,5	200,6	336,1
Coeficiente de Variação (%)	0,0	0,1	5,8	10,7
Leitura 3	4301	2910	1612	1986
Desvio padrão	1,7	1,9	0,8	183,7
Coeficiente de Variação (%)	0,0	0,1	0,0	9,3
Leitura 4	3136	2230	1670	1314
Desvio padrão	413,8	1,8	44,1	104,9
Coeficiente de Variação (%)	13,2	0,1	2,6	8,0
Leitura 5	2371	1992	1604	1435
Desvio padrão	182,6	2,1	35,0	1,3
Coeficiente de Variação (%)	7,7	0,1	2,2	0,1

5.2.3 Energia e amplitude máxima

Os resultados médios obtidos pelos parâmetros de energia inicial e total, e amplitude máxima, juntamente com o desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados nas Tabelas 5.13, 5.14 e 5.15.

Tabela 5.13: Parâmetros de energia na viga 1

	Amplitude máxima (V)		Energia inicial (V.µs)		Energia total (V.µs)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	500,0	500,0	0,0510	0,1341	0,1227	0,2710
Desvio padrão	0,0	0,0	0,0048	0,0025	0,0130	0,0046
Coefficiente de Variação (%)	0,0	0,0	9,4	1,9	10,6	1,7
Leitura 2	500,0	500,0	0,0670	0,1364	0,1527	0,2709
Desvio padrão	0,0	0,0	0,0039	0,0026	0,0097	0,0046
Coefficiente de Variação (%)	0,0	0,0	5,8	1,9	6,4	1,7
Leitura 3	299,8	500,0	0,0143	0,0679	0,0573	0,1307
Desvio padrão	36,2	0,0	0,0007	0,0032	0,0033	0,0045
Coefficiente de Variação (%)	12,1	0,0	5,2	4,7	5,8	3,4
Leitura 4	199,3	478,3	0,0056	0,0424	0,0355	0,0882
Desvio padrão	25,4	27,5	0,0004	0,0015	0,0026	0,0014
Coefficiente de Variação (%)	12,8	5,7	7,3	3,5	7,3	1,6
Leitura 5	120,8	262,6	0,0042	0,0204	0,0247	0,0472
Desvio padrão	13,3	23,2	0,0003	0,0016	0,0017	0,0028
Coefficiente de Variação (%)	11,0	8,8	6,6	8,0	7,0	5,9

Tabela 5.14: Parâmetros de energia na viga 2

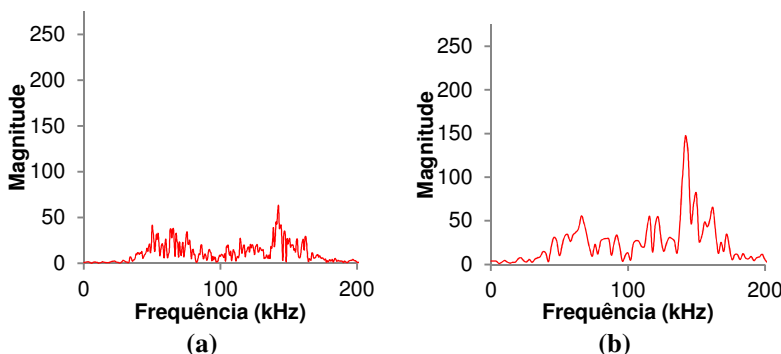
	Amplitude máxima (V)		Energia inicial (V.µs)		Energia total (V.µs)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	500,0	500,0	0,0534	0,1443	0,1424	0,3175
Desvio padrão	0,0	0,0	0,0126	0,0035	0,0347	0,0112
Coeficiente de Variação (%)	0,0	0,0	23,6	2,4	24,4	3,5
Leitura 2	500,0	500,0	0,0865	0,1440	0,2269	0,3064
Desvio padrão	0,0	0,0	0,0046	0,0027	0,0166	0,0058
Coeficiente de Variação (%)	0,0	0,0	5,3	1,9	7,3	1,9
Leitura 3	500,0	500,0	0,0355	0,1084	0,1328	0,2255
Desvio padrão	0,0	0,0	0,0021	0,0021	0,0061	0,0073
Coeficiente de Variação (%)	0,0	0,0	5,9	1,9	4,6	3,2
Leitura 4	314,8	500,0	0,0071	0,0339	0,0512	0,0803
Desvio padrão	34,4	0,0	0,0006	0,0014	0,0041	0,0033
Coeficiente de Variação (%)	10,9	0,0	8,9	4,2	7,9	4,1
Leitura 5	78,2	56,5	0,0011	0,0037	0,0151	0,0127
Desvio padrão	9,2	6,3	0,0005	0,0005	0,0030	0,0011
Coeficiente de Variação (%)	11,7	11,2	39,8	14,1	19,9	9,0

Tabela 5.15: Parâmetros de energia na viga 3

	Amplitude máxima (V)		Energia inicial (V.μs)		Energia total (V.μs)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	479,0	500,0	0,0420	0,1336	0,1239	0,2934
Desvio padrão	34,5	0,0	0,0163	0,0026	0,0446	0,0091
Coefficiente de Variação (%)	7,2	0,0	38,8	1,9	36,0	3,1
Leitura 2	500,0	500,0	0,0636	0,1389	0,1847	0,2686
Desvio padrão	0,0	0,0	0,0035	0,0023	0,0120	0,0090
Coefficiente de Variação (%)	0,0	0,0	5,5	1,7	6,5	3,4
Leitura 3	500,0	500,0	0,0200	0,0613	0,0929	0,1475
Desvio padrão	0,0	0,0	0,0009	0,0017	0,0042	0,0039
Coefficiente de Variação (%)	0,0	0,0	4,7	2,8	4,5	2,6
Leitura 4	140,5	228,0	0,0039	0,0165	0,0303	0,0482
Desvio padrão	9,9	22,7	0,0011	0,0008	0,0037	0,0024
Coefficiente de Variação (%)	7,1	10,0	28,3	4,9	12,3	4,9
Leitura 5	70,8	164,3	0,0011	0,0094	0,0150	0,0281
Desvio padrão	4,3	8,4	0,0004	0,0003	0,0009	0,0007
Coefficiente de Variação (%)	6,0	5,1	40,0	2,7	6,2	2,3

5.2.4 Magnitude e picos de frequência máxima e frequência central

A Figura 5.12 exibe os gráficos gerados no domínio da frequência em uma das leituras realizadas para os quatro intervalos de tempo utilizados.



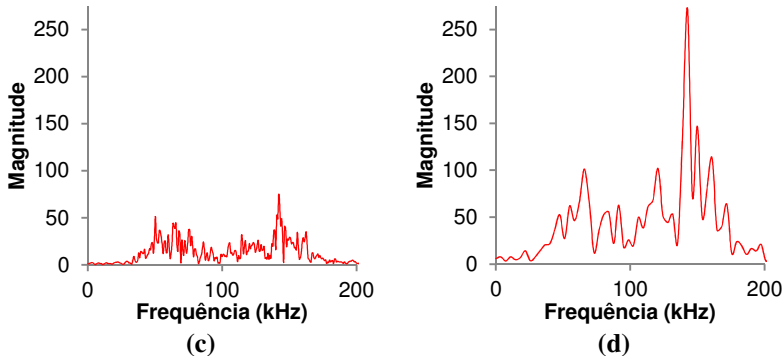


Figura 5.12: Espectro de frequências - Intervalo de tempo - a) 0 a 1600 μ s; b) 0 a 500 μ s; c) t_{pulso} a 1600 μ s; d) t_{pulso} a 500 μ s

A variação do intervalo de tempo utilizado para obtenção dos espectros de frequência trouxe resultados bem distintos quando o tempo máximo variou de 1600 μ s para 500 μ s. Os gráficos são mais claros quando o intervalo de tempo é menor.

A retirada dos ruídos, que antecedem o tempo de chegada do pulso, não trouxe importante modificação no espectro de frequências onde o limite de tempo foi 1600 μ s. No entanto, para o limite de tempo de 500 μ s, percebe-se que a retirada destes ruídos melhorou a visualização do gráfico (Figura 5.12-d).

Com isso, são apresentados nas Tabelas 5.16, 5.17 e 5.18 os valores médios encontrados pelos parâmetros de frequência, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação, apenas para o intervalo “ t_{pulso} a 500 μ s”. Os outros resultados para os demais intervalos estão exibidos no Apêndice A.

Tabela 5.16: Parâmetros de frequência na viga 1 - t_{pulso} a 500 μs

	Pico de frequência máxima (kHz)		Magnitude da frequência máxima		Frequência central (kHz)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	146,6	151,6	130,3	278,6	119,0	122,0
Desvio padrão	5,9	0,2	6,1	23,3	1,2	2,1
Coefficiente de Variação (%)	4,0	0,1	4,7	8,4	1,0	1,7
Leitura 2	152,1	151,6	181,7	275,8	119,8	128,4
Desvio padrão	6,9	0,1	13,2	14,3	0,5	1,6
Coefficiente de Variação (%)	0,0	0,0	7,2	5,2	0,0	0,0
Leitura 3	143,3	152,5	50,1	147,0	107,7	118,8
Desvio padrão	0,1	0,4	4,3	12,5	0,9	2,0
Coefficiente de Variação (%)	0,1	0,3	8,6	8,5	0,8	1,7
Leitura 4	67,0	124,9	21,9	79,2	104,5	117,6
Desvio padrão	0,7	13,8	4,2	6,9	2,3	1,2
Coefficiente de Variação (%)	1,0	11,1	19,1	8,7	2,2	1,0
Leitura 5	66,2	136,1	18,1	43,5	111,2	120,7
Desvio padrão	0,0	16,2	2,0	7,4	3,6	1,9
Coefficiente de Variação (%)	0,0	11,9	11,0	16,9	3,3	1,6

Tabela 5.17: Parâmetros de frequência na viga 2 - t_{pulso} a 500 μ s

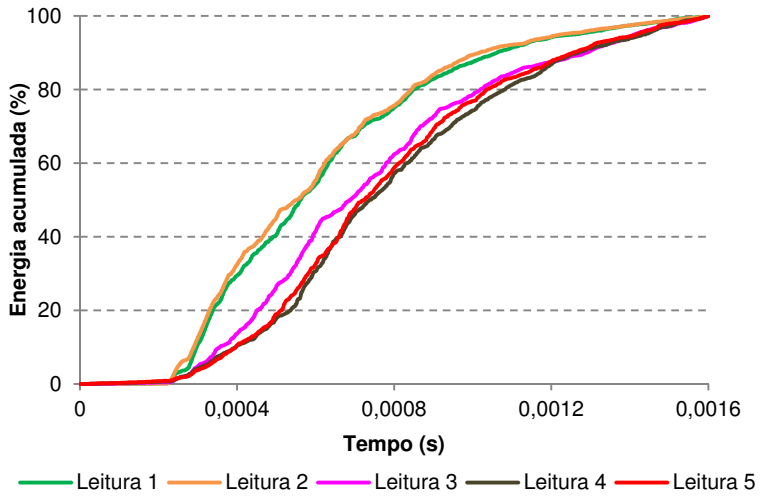
	Pico de frequência máxima (kHz)		Magnitude da frequência máxima		Frequência central (kHz)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	142,5	161,1	162,8	238,3	112,8	122,5
Desvio padrão	0,2	0,2	47,1	18,0	5,1	1,5
Coeficiente de Variação (%)	0,1	0,1	28,9	7,5	4,5	1,2
Leitura 2	142,6	161,1	275,6	235,9	111,7	120,7
Desvio padrão	0,0	0,2	32,0	26,3	0,9	1,6
Coeficiente de Variação (%)	0,0	0,0	11,6	11,2	0,0	0,0
Leitura 3	107,0	153,0	107,7	177,3	108,2	122,0
Desvio padrão	40,3	8,9	9,2	15,5	1,4	2,0
Coeficiente de Variação (%)	37,6	5,8	8,6	8,8	1,3	1,6
Leitura 4	108,1	96,1	33,5	73,3	117,4	112,9
Desvio padrão	0,0	20,0	2,9	6,9	1,7	1,5
Coeficiente de Variação (%)	0,0	20,8	8,6	9,5	1,5	1,3
Leitura 5	142,9	151,4	29,3	12,1	124,6	115,9
Desvio padrão	8,0	2,3	6,9	2,1	1,8	1,8
Coeficiente de Variação (%)	5,6	1,5	23,4	17,1	1,5	1,6

Tabela 5.18: Parâmetros de frequência na viga 3 - t_{pulso} a 500 μs

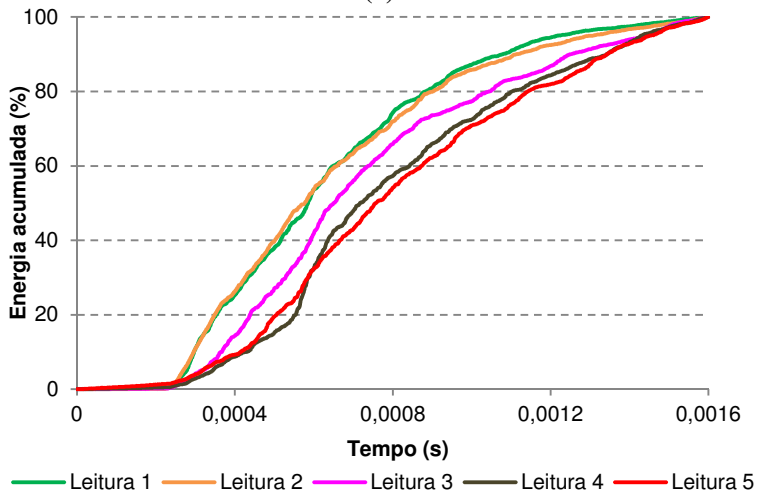
	Pico de frequência máxima (kHz)		Magnitude da frequência máxima		Frequência central (kHz)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	85,2	124,0	97,6	170,0	106,2	112,9
Desvio padrão	33,9	8,0	35,6	8,6	3,3	1,5
Coefficiente de Variação (%)	39,8	6,4	36,5	5,0	3,1	1,4
Leitura 2	90,9	150,0	170,6	184,9	107,7	114,0
Desvio padrão	35,5	5,0	14,7	16,1	2,9	1,7
Coefficiente de Variação (%)	0,0	0,0	8,6	8,7	0,0	0,0
Leitura 3	63,6	153,4	69,7	110,0	108,8	114,2
Desvio padrão	0,4	0,0	3,4	11,1	5,0	2,9
Coefficiente de Variação (%)	0,6	0,0	4,9	10,0	4,6	2,5
Leitura 4	156,5	142,2	19,4	52,6	109,1	117,2
Desvio padrão	0,8	0,1	3,2	7,8	5,1	1,2
Coefficiente de Variação (%)	0,5	0,1	16,4	14,9	4,7	1,0
Leitura 5	59,8	130,7	18,5	28,7	108,1	121,5
Desvio padrão	2,6	8,7	3,2	0,9	7,5	1,8
Coefficiente de Variação (%)	4,3	6,6	17,4	3,1	6,9	1,5

5.2.5 Energia acumulada

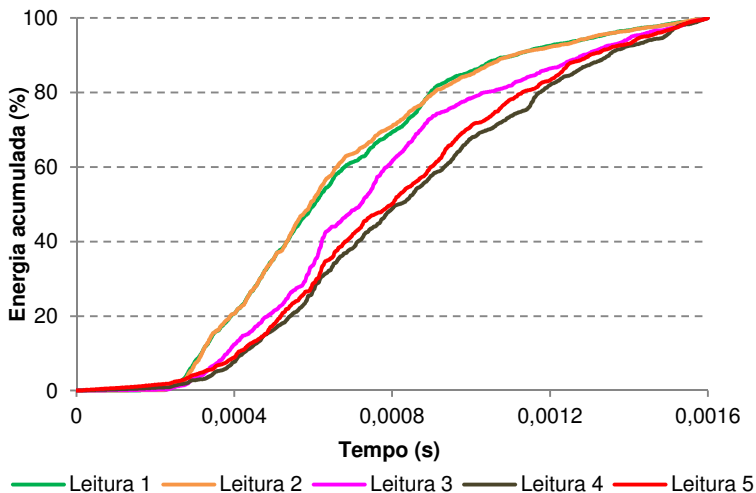
Assim como nas placas, nas vigas este parâmetro também possuía grande quantidade de curvas, devido ao elevado número de leituras realizadas em um mesmo ponto. Assim, devido a pouca variação entre elas numa mesma leitura, apenas uma curva foi escolhida aleatoriamente. Nas Figuras 5.13 e 5.14 são exibidas as curvas de energia acumulada de cada uma das leituras, nas posições 1 e 2, respectivamente.



(a)

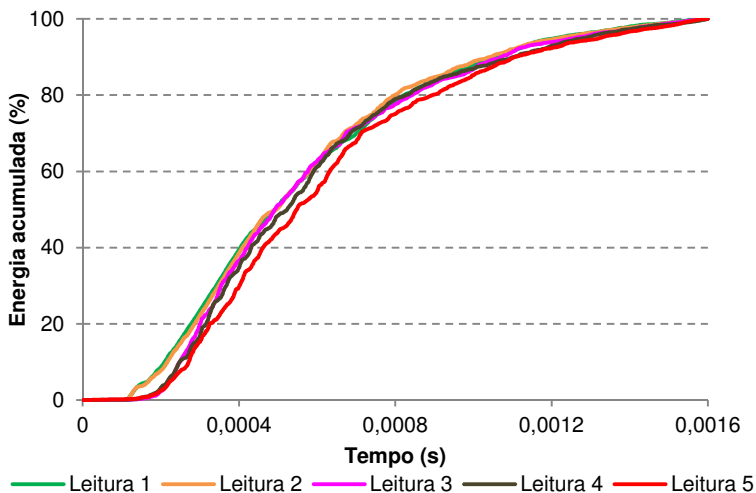


(b)

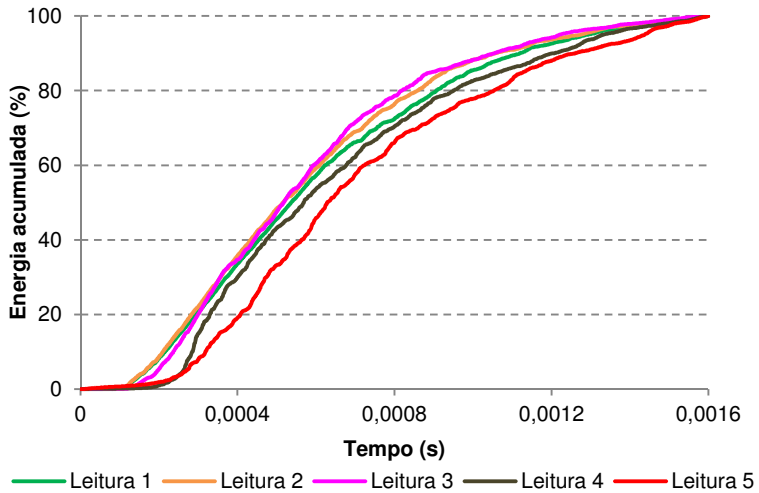


(c)

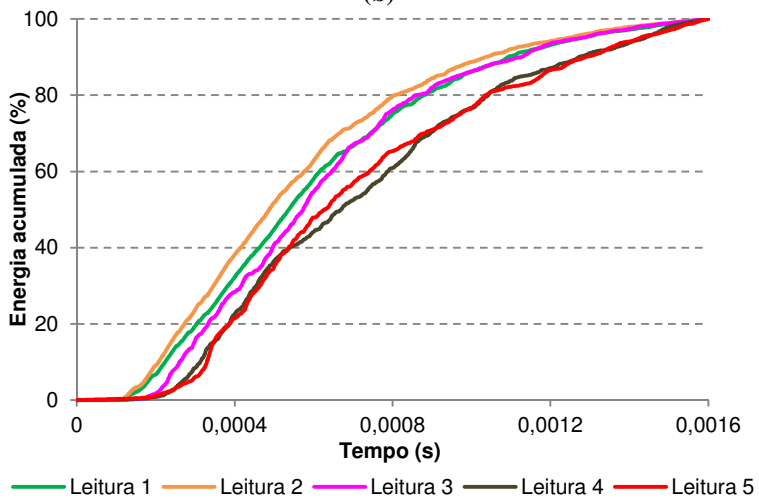
Figura 5.13: Energia acumulada na posição 1 - a) Viga 1; b) Viga 2; c) Viga 3



(a)



(b)



(c)

Figura 5.14: Energia acumulada na posição 2 - a) Viga 1; b) Viga 2; c) Viga 3

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos dados obtidos nos ensaios realizados nas placas e nas vigas, este capítulo trata da análise dos resultados.

6.1 PLACAS

A análise dos resultados das placas foi dividida em duas partes. Os parâmetros dados por um valor absoluto passaram por uma análise de variância, com intervalo de confiança de 95%, a fim de descobrir se haviam diferenças significativas entre as médias dos diferentes parâmetros nas placas fissuradas e não fissuradas. Já a energia acumulada foi analisada separadamente devido à impossibilidade de utilização desta análise estatística.

6.1.1 Parâmetros submetidos à análise de variância (ANOVA)

Utilizando a análise da variância nas duas direções lidas do concreto e na argamassa, têm-se os resultados apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Análise da variância em cada um dos parâmetros utilizados na placa de concreto e argamassa

	Concreto (1-20)		Concreto (21-32)		Argamassa	
	F_{tabelado} (95%)	$F_{\text{calculado}}$	F_{tabelado} (95%)	$F_{\text{calculado}}$	F_{tabelado} (95%)	$F_{\text{calculado}}$
Velocidade pulso	4,11	198,75	4,35	58,45	4,11	10,35
Velocidade grupo		125,16		15,20		89,02
Amplitude máx.		0,50		90,29		18,55
Energia inicial		29,08		141,23		73,10
Energia total		1,71		74,15		31,65
Freq. máx.		3,20		0,18		1,28
Magn. freq. máx		7,71		58,50		52,35
Freq. central		0,09		84,68		30,28

Em vermelho estão os valores de $F_{\text{calculado}}$ menores do que o F_{tabelado} , e que, portanto, devem ser descartados, pois não apresentaram diferenças significativas entre as médias nas placas fissuradas e não fissuradas, considerando 95% de confiança.

Em todos os casos, o pico de frequência máxima não atingiu a confiabilidade desejada, e por isso, seus resultados não serão analisados. Desta maneira, percebeu-se que este parâmetro, assim como ocorreu nos experimentos de Selleck et. al (1998), único autor entre os citados neste trabalho que utilizou o pico de frequência, não trouxe bons resultados. Os demais parâmetros mostraram-se sensíveis à fissuração existente nas placas de concreto, nas leituras de 21 a 32, e nas de argamassa, de acordo com a análise realizada.

Nas leituras de 1 a 20 nas placas de concreto, quatro parâmetros foram descartados, conforme a Tabela 6.1, e não serão analisados. Além do pico de frequência máxima, a amplitude máxima, a energia total e a frequência central também não exibiram diferenças significativas entre suas médias. Isto pode ser explicado pela ocorrência de fissuras preferencialmente paralelas à menor dimensão da placa, como pode ser visualizada na Figura 4.3. Assim, as ondas de ultrassom não se propagavam transversalmente nesta direção de leitura. Com isso a existência das fissuras não pode ser percebida por vários parâmetros, o que demonstra a importância do cruzamento das fissuras pela onda de ultrassom.

6.1.1.1 Velocidade de pulso e de grupo

Numa análise prévia dos resultados das placas de concreto (Tabelas 5.1 e 5.2) foi possível perceber que, mesmo comparando-se valores da mesma placa, sem fissuras, as leituras de 1 a 20 geraram velocidades de pulso em torno de 5% maiores do que as leituras de 21 a 32. Duas hipóteses que justificam isto são levantadas: a variabilidade do ensaio em si, ou ainda a influência do efeito de borda. Apesar de o concreto ser o mesmo, provavelmente houve uma pequena interferência do efeito de borda nos resultados devido à limitada espessura das placas e, com isso, o posicionamento dos transdutores próximo à borda. Assim, como o comprimento de onda percorrido em ambas as direções é diferente, no caminho mais curto (leituras de 1-20), o efeito de borda é menor, e conseqüentemente, a velocidade é ligeiramente maior.

Avaliando somente os resultados médios das placas de concreto, apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2, e comparando-se os resultados para a placa não fissurada com a placa fissurada, constata-se que a velocidade de pulso média nas leituras de 1 a 20 (paralelas à menor dimensão da placa) sofreu uma redução de aproximadamente 5% na placa não fissurada, enquanto que para as leituras 21 a 32 (paralelas à maior dimensão da placa) esta redução foi bem maior, em torno de 18%.

Esta diferente redução que ocorreu também pode ser explicada pela existência de fissuras preferencialmente paralelas à menor dimensão da placa. Pelo mesmo motivo, aliado ao fato dos pontos de leitura nem sempre cruzarem a mesma quantidade de fissuras, o coeficiente de variação dos dados da placa fissurada nas leituras de 21 a 32 foi maior que na outra direção, chegando próximo a 9%, enquanto as demais não ultrapassaram 1,5%.

Por outro lado, este efeito observado da fissuração na redução dos valores de velocidade de pulso na placa fissurada não ocorreu nos valores de velocidade de grupo. A redução obtida nas leituras de 1 a 20 foi de 40%, bem superior aos 26% observados para as leituras 21 a 32. Uma provável explicação poderia ser a dependência da velocidade de grupo de outro parâmetro, como a amplitude máxima, a partir da qual ela é calculada. Logo, a variação de dados que ocorre nesta amplitude, especialmente na placa fissurada devido à maior heterogeneidade, poderia refletir diretamente nos resultados da velocidade de grupo.

Analisando as placas de argamassa (Tabela 5.3), percebe-se que na placa fissurada a velocidade de pulso diminuiu 11%, e a de grupo 43%. As fissuras ocorreram de uma forma mais aleatória, em ambas as direções (Figura 4.4), e nesta situação, os dois parâmetros foram sensíveis à fissuração existente.

Tanto nas placas de argamassa quanto nas de concreto o coeficiente de variação do parâmetro velocidade de grupo se mostrou sempre maior do que a de pulso. Justifica-se isto também pela influência da amplitude máxima.

6.1.1.2 Energia e amplitude máxima

Nas leituras de 1 a 20, considerando as médias apresentadas na Tabela 5.4, a energia inicial reduziu 31% na placa fissurada. Os demais parâmetros foram descartados previamente pela análise estatística realizada.

Avaliando as médias da outra direção de leitura, de 21 a 32 (Tabela 5.5), a amplitude máxima e a energia total exibiram redução em torno de 64% e 59%, respectivamente, na placa fissurada. Enquanto isso, a energia inicial trouxe resultados ainda melhores, com 86% de redução nesta mesma amostra.

Na placa de argamassa fissurada, a amplitude máxima teve redução de 34%, a energia inicial de 68%, e a total de 52%, em relação à placa sem fissuras.

6.1.1.3 Magnitude da frequência máxima e frequência central

A Tabela 5.7, onde são apresentados os parâmetros de frequência nas leituras de 1 a 20 da placa de concreto, mostra que a magnitude da frequência máxima, único parâmetro de frequência válido nesta direção, caiu 18% na placa fissurada.

Já na outra direção (Tabela 5.8), a magnitude da frequência máxima e a frequência central declinaram 58% e 11%, respectivamente, na placa fissurada.

Por fim, nas placas de argamassa, enquanto a magnitude da frequência máxima reduziu 60% no material fissurado, a frequência central exibiu diminuição de apenas 6%.

6.1.1.4 Comparação de eficiência entre os parâmetros

A comparação de eficiência entre os parâmetros foi feita através da normalização de cada um deles em função de seus respectivos valores na placa não fissurada. Assim, pode-se visualizar diretamente quais foram as variações entre a placa fissurada e não fissurada. O desvio padrão foi plotado em cada um dos parâmetros, sendo representado por uma linha vermelha, conforme a legenda das figuras.

Inicia-se a comparação pela avaliação individual de cada um dos três diferentes casos de leitura. No primeiro, realizado nas placas de concreto, com pontos de 1 a 20, os resultados normalizados dos parâmetros válidos estão na Figura 6.1.

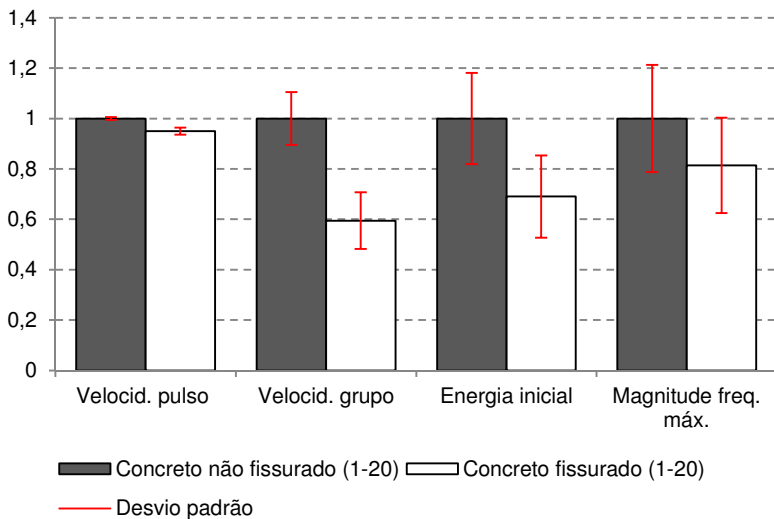


Figura 6.1: Comparação entre todos os parâmetros válidos nas placas de concreto fissurado e não fissurado (leituras de 1 a 20)

Para a outra direção da placa de concreto (21 a 32), a comparação normalizada entre os parâmetros de análise é apresentada na Figura 6.2.

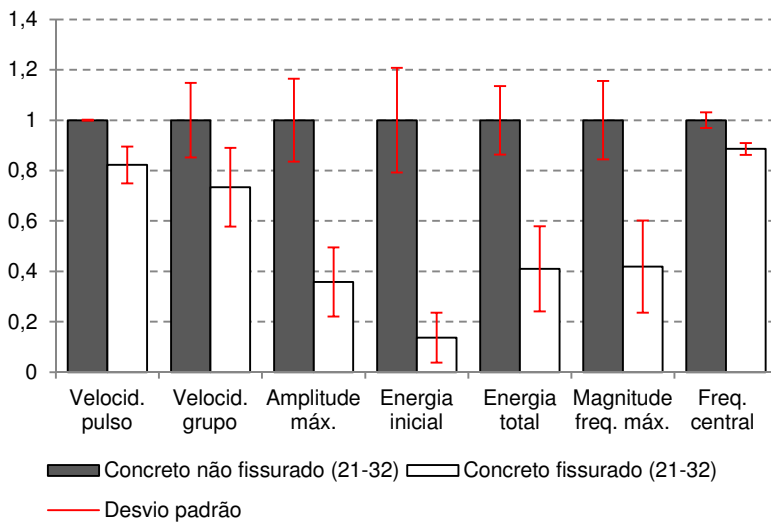


Figura 6.2: Comparação entre todos os parâmetros válidos nas placas de concreto fissurado e não fissurado (leituras de 21 a 32)

Por fim, nas placas de argamassa, os parâmetros válidos normalizados estão dispostos na Figura 6.3.

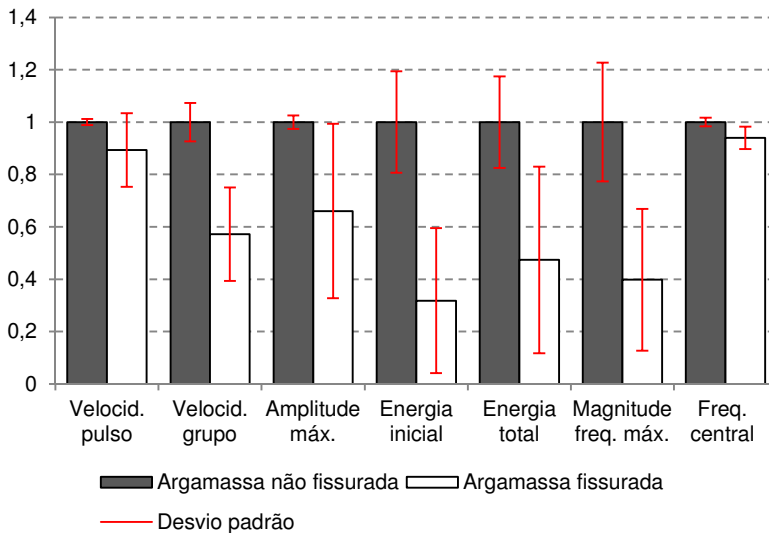


Figura 6.3: Comparação entre todos os parâmetros válidos nas placas de argamassa fissurada e não fissurada

Percebe-se que, pela análise visual destas comparações, devido ao desvio padrão existente, é difícil classificar quais os melhores parâmetros encontrados para cada caso.

Desta maneira, procurou-se utilizar novamente a análise da variância para encontrar quais os parâmetros apresentavam diferenças significativas em suas médias para as placas fissuradas e não fissuradas, desta vez, utilizando intervalos de confiança cada vez mais rigorosos, que vão de 99,00% a 99,99%.

Fez-se, então, esta análise em cada um dos casos, conforme mostram as Tabelas 6.2, 6.3 e 6.4.

Tabela 6.2: Análise da variância em cada um dos parâmetros utilizados na placa de concreto (leituras de 1 a 20)

Concreto (1-20)	$F_{\text{tabelado}} (99,00\%)$	$F_{\text{tabelado}} (99,90\%)$	$F_{\text{tabelado}} (99,99\%)$	$F_{\text{calculado}}$
Velocidade pulso	7,40	12,83	19,13	198,75
Velocidade grupo				125,16
Energia inicial				29,08
Magn. freq. máx				7,71

Tabela 6.3: Análise da variância em cada um dos parâmetros utilizados na placa de concreto (leituras de 21 a 32)

Concreto (21-32)	F _{tabelado} (99,00%)	F _{tabelado} (99,90%)	F _{tabelado} (99,99%)	F _{calculado}
Velocidade pulso	8,09	14,82	23,40	58,45
Velocidade grupo				15,20
Amplitude máx.				90,29
Energia inicial				141,23
Energia total				74,15
Magn. freq. máx				58,50
Freq. central				84,68

Tabela 6.4: Análise da variância em cada um dos parâmetros utilizados na placa de argamassa

Argamassa	F _{tabelado} (99,00%)	F _{tabelado} (99,90%)	F _{tabelado} (99,99%)	F _{calculado}
Velocidade pulso	7,40	12,83	19,13	10,35
Velocidade grupo				89,02
Amplitude máx.				18,55
Energia inicial				73,10
Energia total				31,65
Magn. freq. máx				52,35
Freq. central				30,28

Todos os parâmetros ultrapassaram 99% de confiabilidade nesta análise, ou seja, demonstraram sensibilidade à fissuração existente. Em vermelho estão os valores de $F_{\text{calculado}}$ menores do que o “ $F_{\text{tabelado}} 99,9\%$ ”, e que, portanto, não obtiveram 99,9% de confiabilidade nesta análise. Em laranja têm-se os parâmetros que, apesar de muito sensíveis, não chegaram a 99,99% de confiança.

É possível perceber que, em cada caso, os parâmetros se comportam de maneira diferente. Nas placas de concreto, por exemplo, a velocidade de pulso esteve entre os parâmetros mais sensíveis, alcançando 99,99% de confiabilidade na análise estatística, enquanto que, nas placas de argamassa, não chegou a 99% de confiança.

Os parâmetros amplitude máxima e velocidade de grupo também tiveram a sensibilidade variada entre um caso e outro. Assim, diante dos ótimos resultados dos demais parâmetros, pode-se dizer que estes três parâmetros - velocidade de pulso, amplitude máxima e

velocidade de grupo - estariam em um patamar de confiança inferior para esta análise de retração plástica.

Exceto o pico de frequência máxima, já descartada anteriormente em todos os casos, os parâmetros de frequência mostraram-se muito sensíveis à fissuração existente. A frequência central não se mostrou útil na análise das placas de concreto nas leituras de 1 a 20, porém, salienta-se que esta direção de leitura não é a mais adequada, devido à preferencial direção de ocorrência das fissuras.

Por fim, os parâmetros de energia apresentaram-se entre os mais sensíveis nas três avaliações realizadas, reiterando os bons resultados obtidos pelos pesquisadores Hauwaert, Thimus e Delannay (1998 e 1999) e Aggelis e Shiotani (2008 e 2009). Destaca-se a energia inicial, isto porque, nos tempos iniciais em materiais sem danos, as amplitudes da onda são maiores, aumentando o valor da energia inicial. Com o passar do tempo essa onda perde amplitude, e conseqüentemente, energia, fazendo com que o parâmetro que considere o pulso todo, como a energia total, não traga tanta mudança entre uma placa e outra. Já nas placas fissuradas a energia inicial é menor desde o início, pois a existência de não homogeneidades, como a fissuração, diminui a energia com que a onda se propaga.

Diante de todos os resultados, identifica-se que no concreto, apesar de apresentar menor fissuração e de ser um material mais heterogêneo do que a argamassa, a maioria dos parâmetros obtidos pelo formato de onda mostraram-se sensíveis. Assim, percebe-se a potencialidade do uso de tais parâmetros, mesmo em situações onde a fissuração não é tão evidente. Isso denota, em geral, a maior sensibilidade obtida, se comparada à velocidade de pulso, comumente utilizada.

6.1.2 Energia acumulada

Através dos resultados já apresentados nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8, em todos os casos, é visível a diferença das curvas referentes à placa não fissurada e as da fissurada, refletindo a eficiência deste parâmetro, também detectada por Shiotani e Aggelis (2009). Para o caso das placas não fissuradas, as curvas de energia apresentam uma inclinação maior, representando algo semelhante ao que a energia inicial mostrou. Nos tempos iniciais, em materiais sem danos, as amplitudes da onda são maiores, aumentando o valor da energia inicial e também da acumulada. Já nas placas fissuradas ambos os parâmetros são menores

desde o início, pois a existência de não homogeneidades, como a fissuração, diminui a energia com que a onda se propaga.

Percebe-se também que há uma variação de dados menor na placa não fissurada, devido à menor heterogeneidade do material. Nas placas danificadas, como as ondas percorrem caminhos que nem sempre apresentam fissuras, essa variação é maior, especialmente nas leituras onde a onda se propaga transversalmente às fissuras, como já exposto.

Na argamassa, nota-se que ambas as curvas apresentam inclinação maior do que na placa de concreto. Isto ocorre devido a maior homogeneidade deste material, fazendo com que as amplitudes iniciais sejam ainda mais acentuadas.

Fazendo uma normalização dos tempos limites máximo e mínimo das regiões delimitadas pelas curvas (valor de correspondente ao “x” demarcado nas curvas) em função do valor do material não fissurado, para cada caso têm-se os gráficos das Figuras 6.4, 6.5 e 6.6.

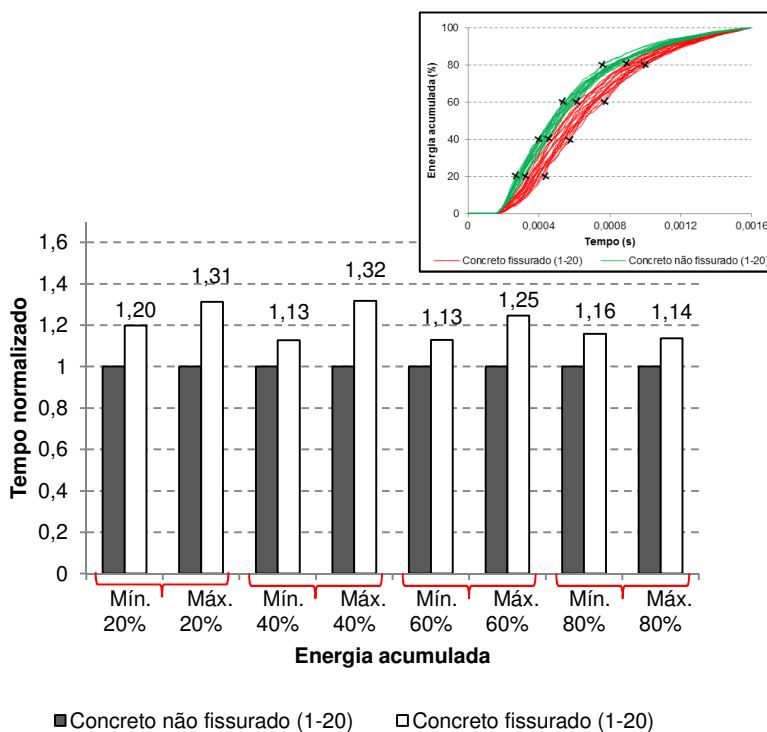


Figura 6.4: Limites de tempo nas curvas de energia acumulada nas placas de concreto (1-20)

Percebe-se pela Figura 6.4 que o atraso no tempo no material fissurado é muito semelhante em todas as porcentagens de energia acumulada, variando em média 17% nos valores mínimos e 26% nos máximos. Isso confirma a sensibilidade deste parâmetro na avaliação de danos causados por retração plástica.

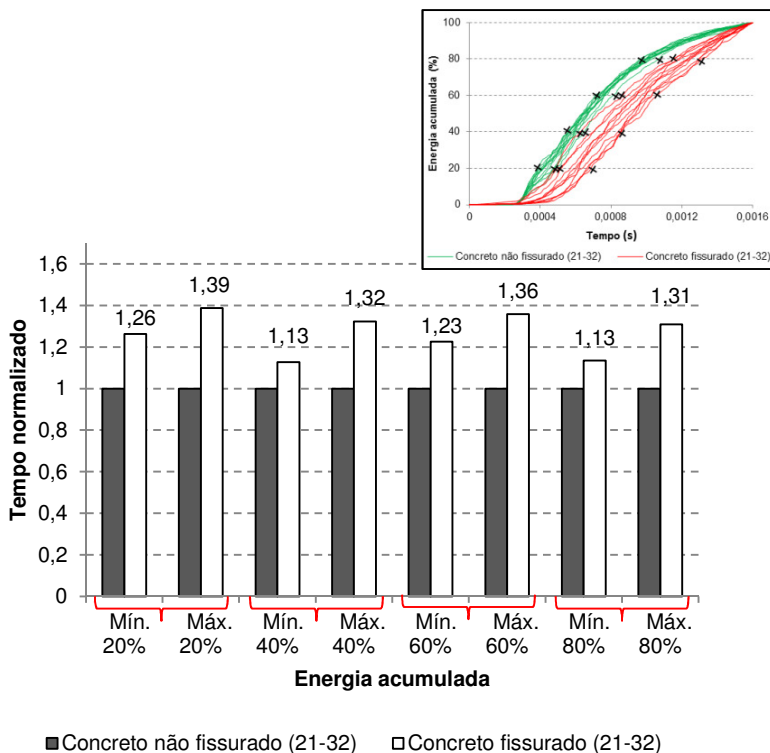


Figura 6.5: Limites de tempo nas curvas de energia acumulada nas placas de concreto (21-32)

Observa-se que, nas leituras de 21 a 32 (Figura 6.5), o atraso no tempo foi semelhante aos anteriores, com uma porcentagem um pouco maior neste caso, com média de 19% nos valores mínimos e 34% nos máximos.

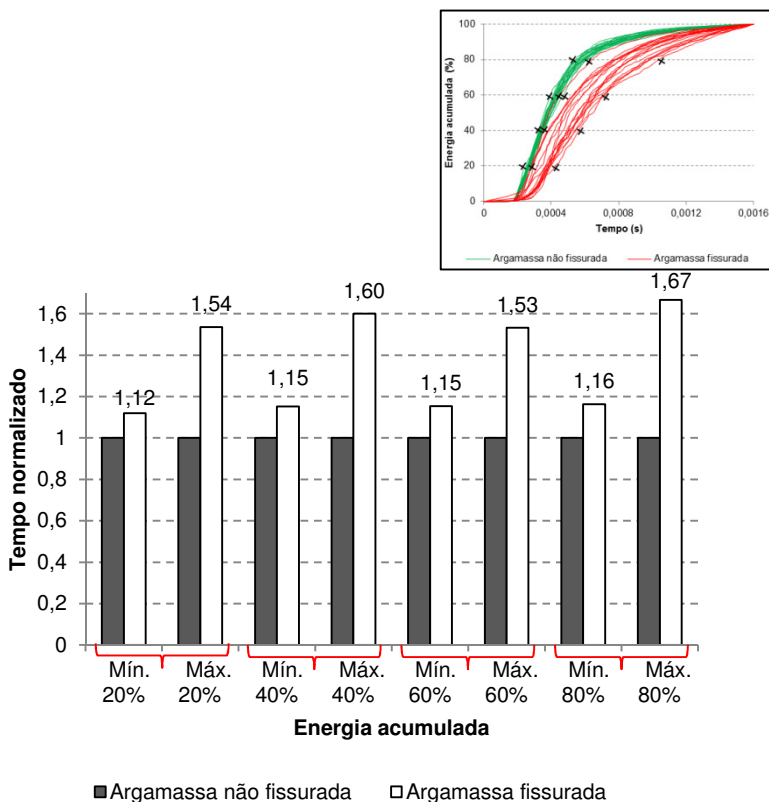


Figura 6.6: Limites de tempo nas curvas de energia acumulada nas placas de argamassa

No caso da argamassa (Figura 6.6), apesar do atraso nos valores mínimos de tempo ser semelhante aos demais casos, com média de 15%, os máximos mostraram maior variação, com aumento médio de 59% do tempo. Esse elevado atraso ocorreu devido às maiores dimensões das fissuras neste material, fazendo com que a curva dos pontos que passavam por elas ficasse com uma inclinação menor, e consequentemente, com chegadas de energia mais tardias.

6.2 VIGAS

A análise dos resultados de cada parâmetro obtidos nas vigas está dividida de acordo com os parâmetros utilizados, assim como

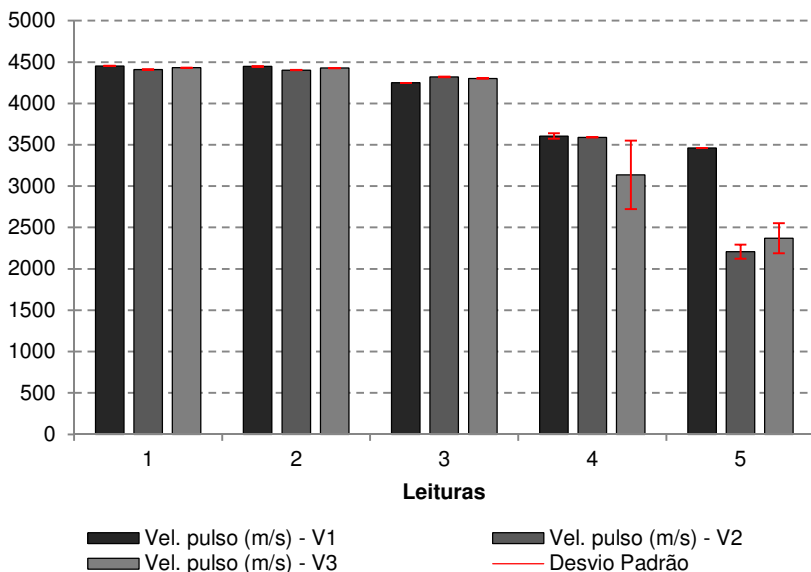
realizado para as placas. No entanto, inicialmente, em cada um deles, as três vigas são analisadas em conjunto, separadas apenas as duas posições de leitura.

Nos gráficos a seguir, estão indicadas as três vigas, em escalas de cinza, denominadas V1, V2, e V3. Os desvios padrão obtidos são apresentados em vermelho, conforme a legenda existente.

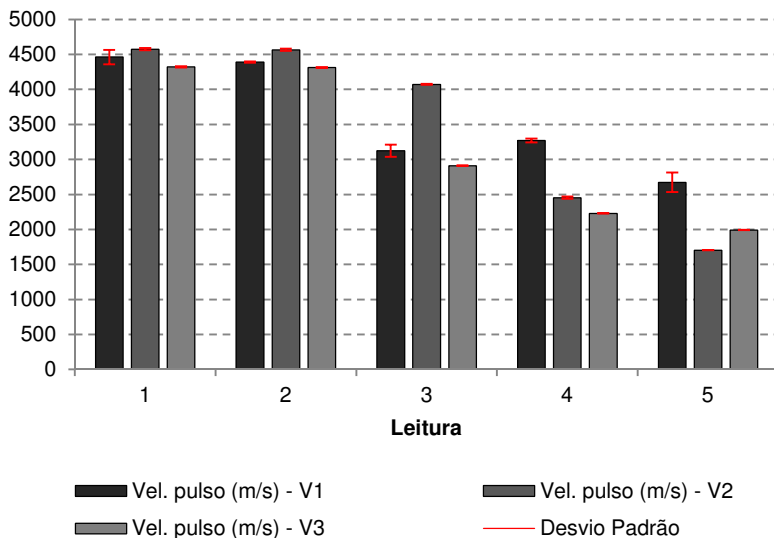
Salienta-se que, na segunda posição de leitura, como as leituras são indiretas, os parâmetros são considerados relativos, pois não correspondem a um sinal onde a propagação da onda ocorre diretamente de centro a centro dos transdutores. Porém, a denominação dos parâmetros não é alterada devido ao fato da análise entre as leituras ser feita de maneira comparativa, não prejudicando os resultados obtidos.

6.2.1 Velocidade de pulso e de grupo

As velocidades de pulso encontradas nas vigas, nas duas posições de leitura, são apresentadas na Figura 6.7.



(a)



(b)

Figura 6.7: Velocidade de pulso nas três vigas - a) Posição 1; b) Posição 2

A tendência demonstrada pela velocidade de pulso foi semelhante em todos os casos. Em ambas as posições (Figura 6.7-a e Figura 6.7-b), nas duas primeiras leituras, ainda sem fissuração aparente, praticamente não houve alteração de velocidade de pulso. Na terceira leitura, a partir da qual foi visível a primeira fissura (após ultrapassar a carga necessária para atingir o momento de fissuração), houve uma ligeira queda deste parâmetro, especialmente na posição 1, e uma inclinação mais acentuada na posição 2.

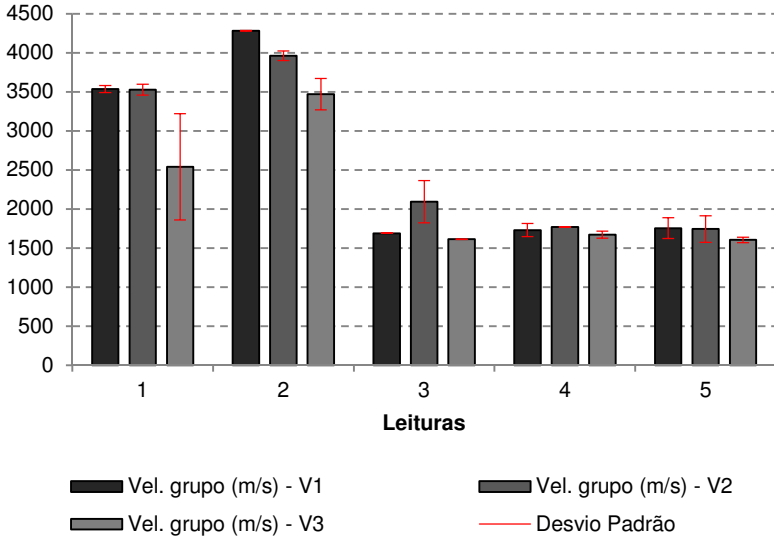
Nas duas leituras posteriores (4 e 5), na primeira posição, as diminuições da velocidade foram mais evidentes do que na leitura 3, devido ao importante crescimento de fissuras. No entanto, na viga 1, a quinta leitura não apresentou grande alteração se comparada à sua anterior. Na segunda posição, novamente na viga 1, a leitura 4 foi ligeiramente maior do que a 3, estando contrário ao esperado.

O desvio padrão das leituras foi pequeno, na maioria dos casos, apresentando valores maiores apenas em algumas leituras com fissuração mais crítica.

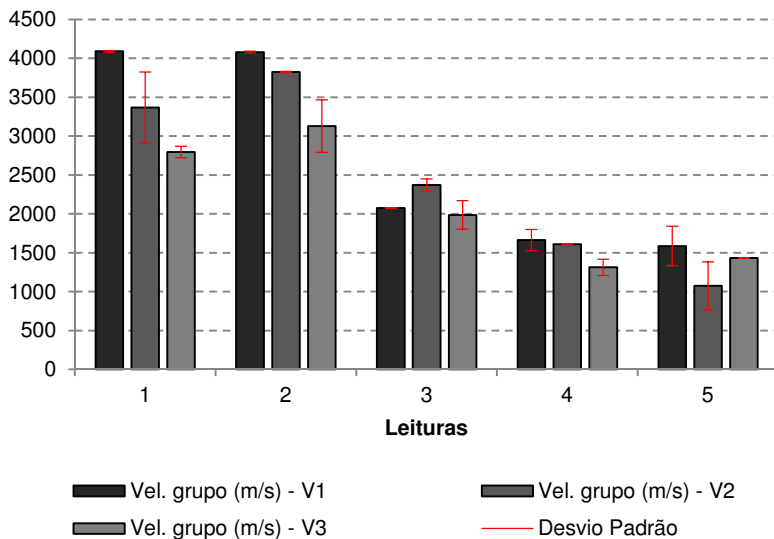
Desta maneira, apesar de dois resultados na viga 1 não estarem de acordo com o esperado, todos os demais tornaram perceptível a

sensibilidade da velocidade de pulso na análise do comportamento de fissuras ao longo do ensaio de flexão.

As velocidades de grupo obtidas pelas leituras de ultrassom nas vigas estão apresentadas na Figura 6.8.



(a)



(b)

Figura 6.8: Velocidade de grupo nas três vigas - a) Posição 1; b) Posição 2

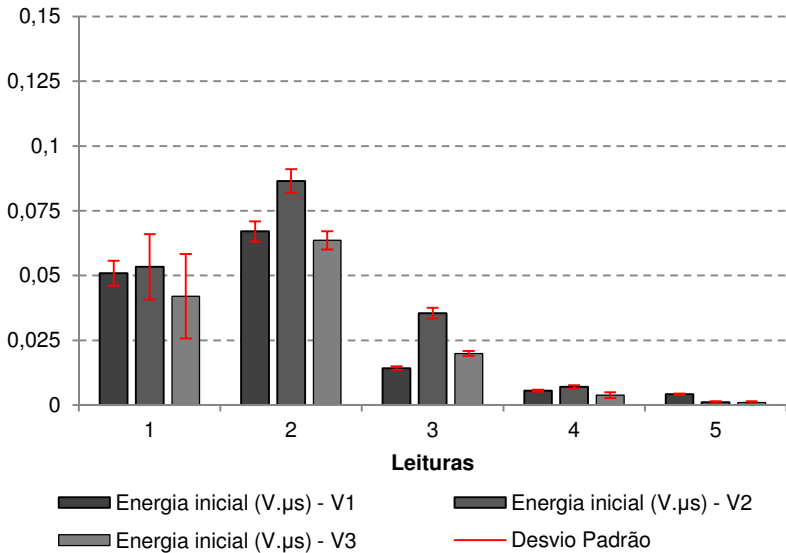
Percebe-se que, na posição 1 (Figura 6.8-a), em especial, a velocidade de grupo não se mostrou um parâmetro de análise adequado (diferentemente do que obtiveram Shiotani e Aggelis, em 2009), pois se comportou de maneira adversa ao sentido de redução esperado.

Apesar do início da fissuração ter sido detectado, na posição 1, o aumento das fissuras não foi percebido. Identifica-se isto pelos resultados das leituras 3, 4 e 5, os quais permanecem semelhantes, mesmo diante de estados de fissuração distintos.

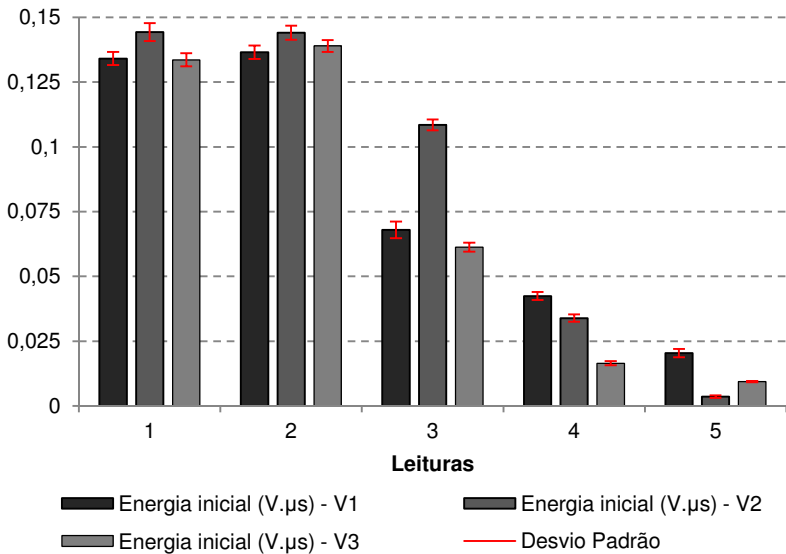
Já na segunda posição (Figura 6.8-b), somente na viga 2 há uma diminuição da velocidade de grupo coerente com o aumento das fissuras. Porém, nas demais vigas os resultados não se comportam de maneira adequada ao estado de fissuração existente em cada leitura.

6.2.2 Energia e amplitude máxima

As energias inicial e total encontradas em todas as vigas são exibidas nas Figuras 6.9 e 6.10, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 6.9: Energia inicial nas três vigas - a) Posição 1; b) Posição 2

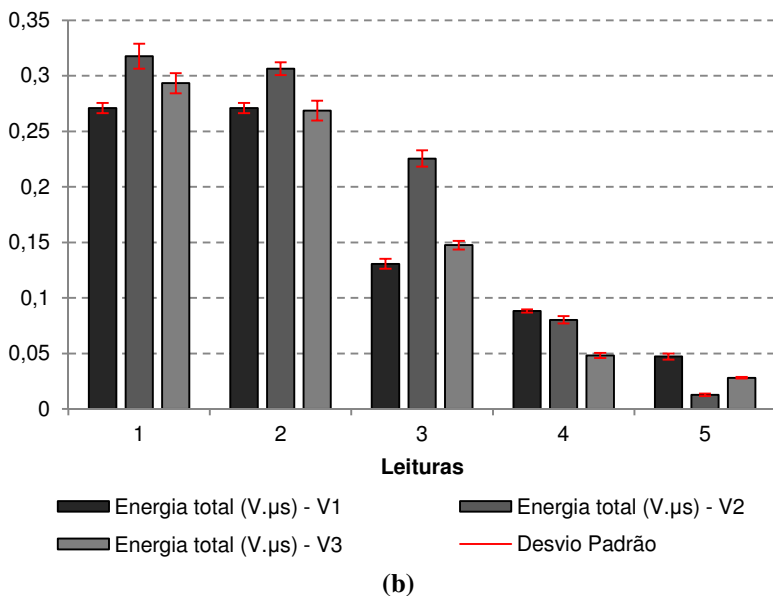
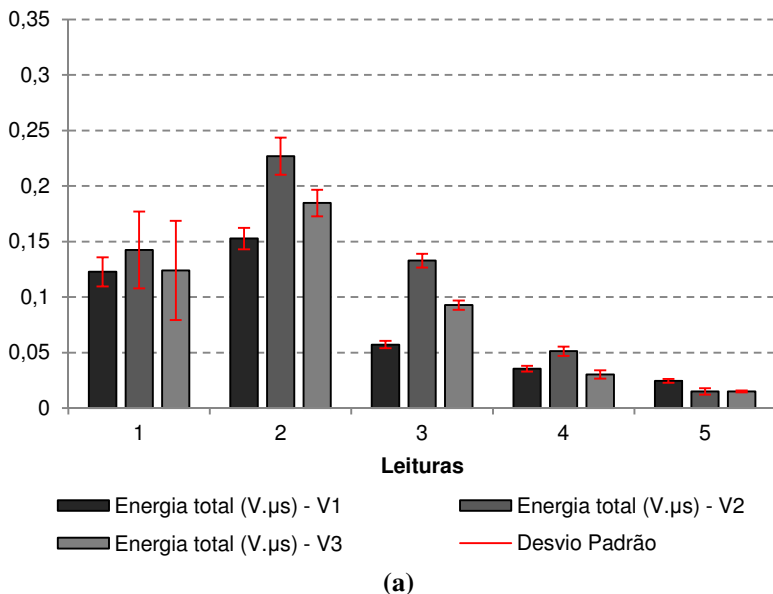
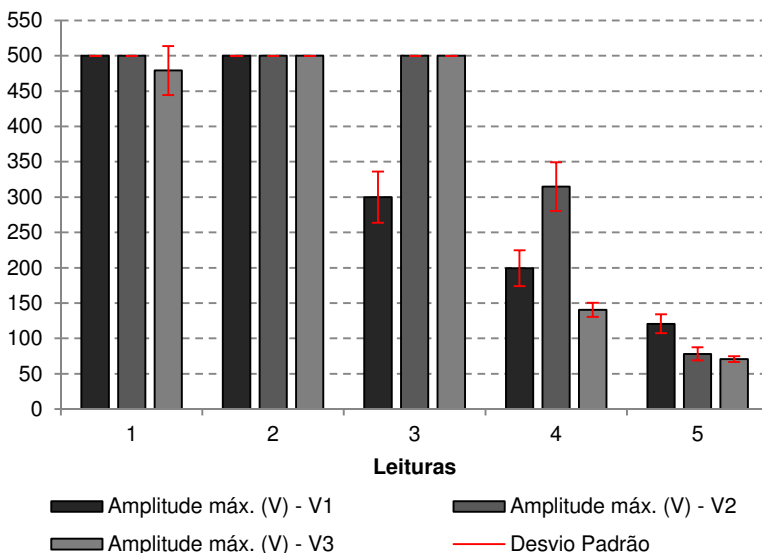


Figura 6.10: Energia total nas três vigas - a) Posição 1; b) Posição 2

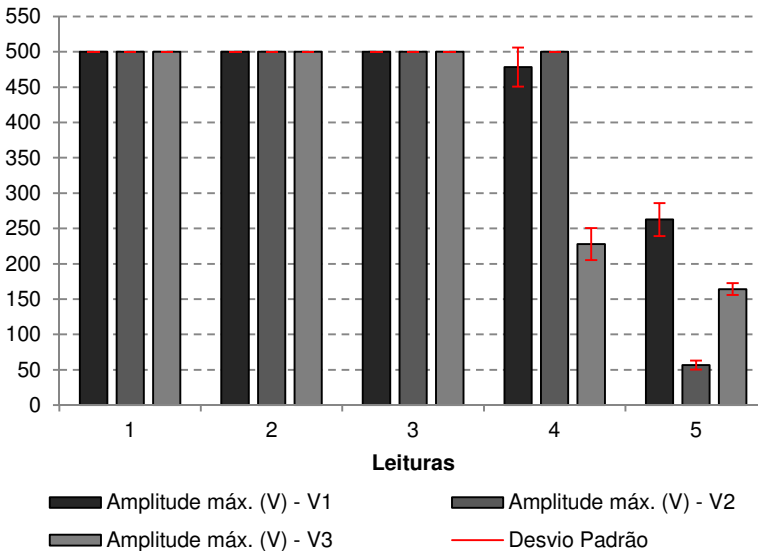
Ambas as energias apresentaram a mesma tendência de resultados em todas as vigas, variando apenas a magnitude dos dados. Em ambas as posições, o início e crescimento de fissuras nas vigas foram claramente percebidos pelos parâmetros de energia (Figuras 6.9 e 6.10). Assim, mais uma vez, reiteram-se a eficiência deste parâmetro, assim como obtida em diferentes pesquisas de Hauwaert, Thimus e Delannay (1998 e 1999) e Aggelis e Shiotani (2008 e 2009).

Na posição 1 (Figura 6.9-a e Figura 6.10-a), no entanto, os dois parâmetros exibiram um aumento significativo entre a leitura 1 e a 2, onde se esperava resultados semelhantes. Porém, os desvios padrão obtidos nestes casos foram os maiores dos parâmetros de energia, e, considerando-os na comparação entre as duas primeiras leituras, a diferença entre elas passa a não ser tão expressiva. Esta variabilidade de dados é comum nos parâmetros de energia devido à influência do acoplamento no período do ensaio, como já comentado no resultado das placas.

Os gráficos comparativos entre as amplitudes máximas obtidas nas diferentes leituras, em todas as vigas, são exibidos na Figura 6.11.



(a)



(b)

Figura 6.11: Amplitude máxima nas três vigas - a) Posição 1; b) Posição 2

Através da visualização dos gráficos da Figura 6.11-a e da Figura 6.11-b, percebe-se que a amplitude máxima não se apresentou como um parâmetro de análise confiável, demonstrando que, apesar dos bons resultados obtidos por Shiotani e Aggelis (2009), há necessidade de maiores estudos quanto à aplicabilidade da amplitude máxima. Considerando todos os resultados, o início da fissuração foi detectado somente na primeira posição da viga 1. Além disso, na posição 2, especialmente, as amplitudes máximas foram muito variadas entre uma viga e outra.

6.2.3 Magnitude, pico de frequência máxima e frequência central

Os gráficos para comparação dos resultados dos parâmetros de frequência máxima e frequência central de todas as vigas, nos quatro intervalos de tempo de análise, foram feitos e avaliados. A Figura 6.12 mostra os dados obtidos para o intervalo “ t_{pulso} a 500 μs ”. Devido à grande quantidade de dados, os gráficos dos demais intervalos são apresentados no Apêndice A.

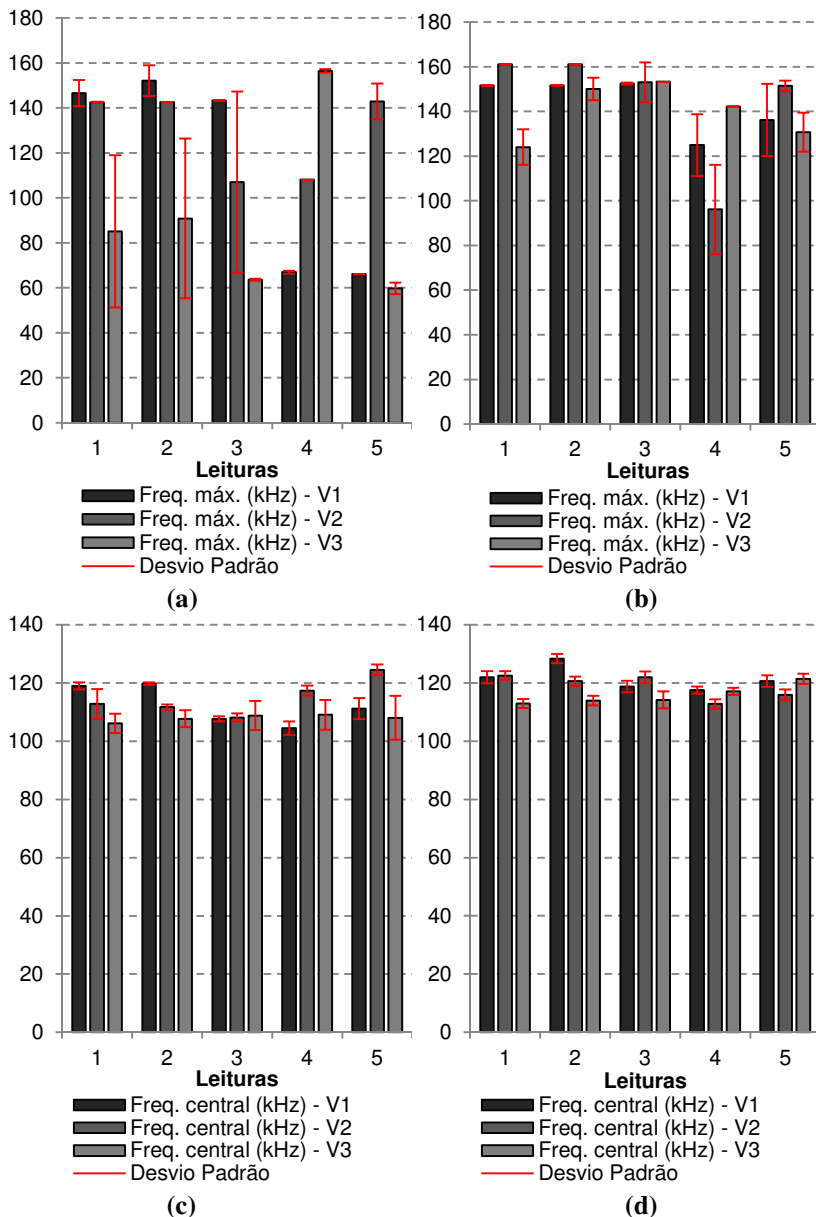
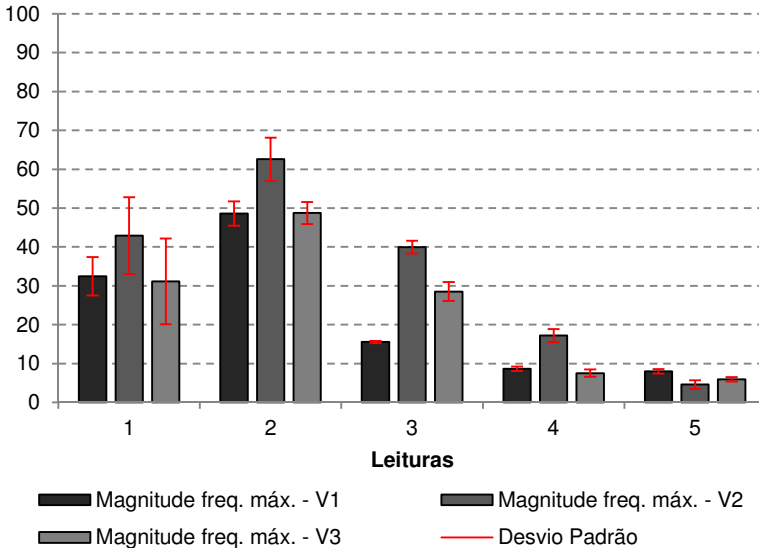


Figura 6.12: Parâmetros de frequência nas três vigas - t_{pulso} a 500 μs - a) Freq. máx. posição 1; b) Freq. máx. posição 2; c) Freq. central. posição 1; d) Freq. central posição 2

Analisando-se todos os intervalos, em ambas as posições de leitura, percebe-se que o pico de frequência máxima apresentou grande variação entre os resultados de uma viga e outra, sendo que, em vários, a diferença entre uma leitura e sua subsequente era incoerente com o aumento da fissuração. A frequência central, por sua vez, exibiu pouca ou nenhuma variação entre os diferentes níveis de carga e fissuração aos quais as vigas foram submetidas. Estes comportamentos são visíveis também nos gráficos da Figura 6.12.

Deste modo, ambos os parâmetros, nas duas posições de leitura, não podem ser considerados sensíveis ao comportamento das fissuras de flexão. Com isso, coloca-se em dúvida a sensibilidade da frequência central, que trouxe bons resultados na avaliação da retração plástica realizada neste estudo e nos experimentos de Shiottani e Aggelis (2009)

Por fim, as magnitudes das frequências máximas dos intervalos “0 a 1600 μs ”, “0 a 500 μs ” e “ t_{pulso} a 1600 μs ” são apresentadas nos gráficos das Figuras 6.13, 6.14 e 6.15, respectivamente.



(a)

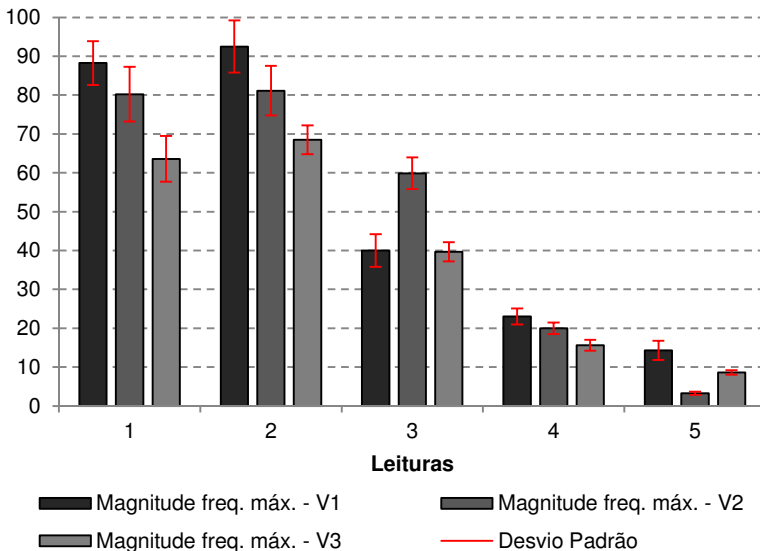
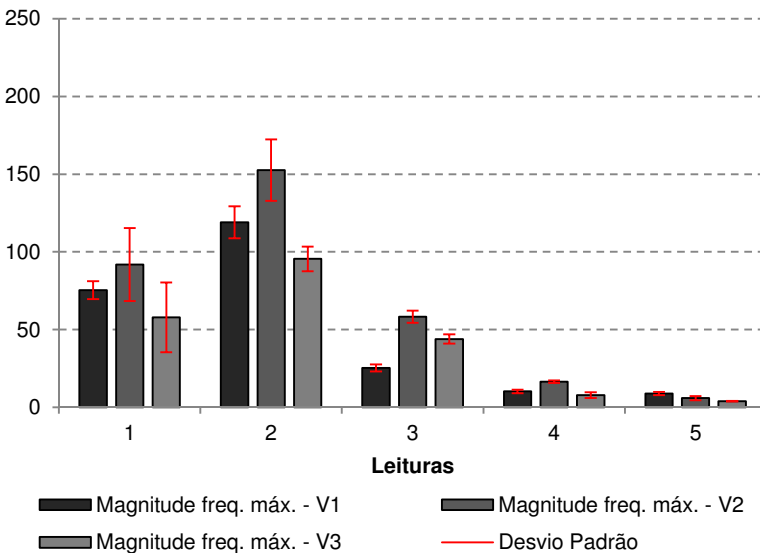
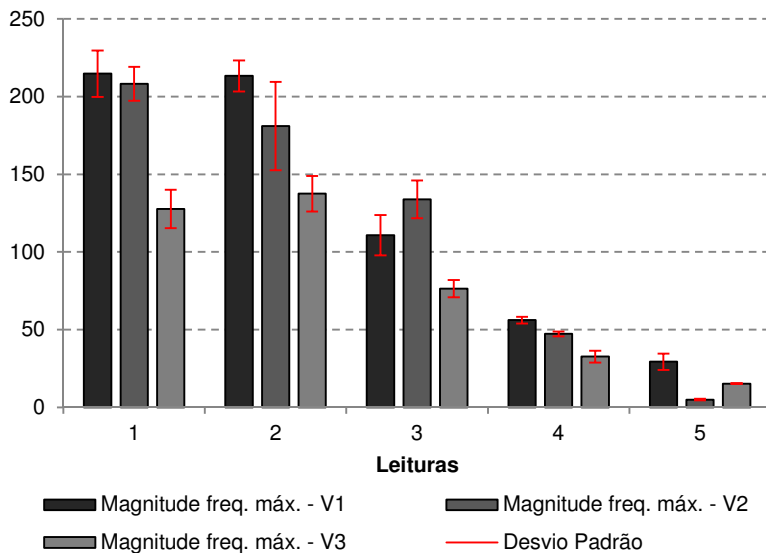


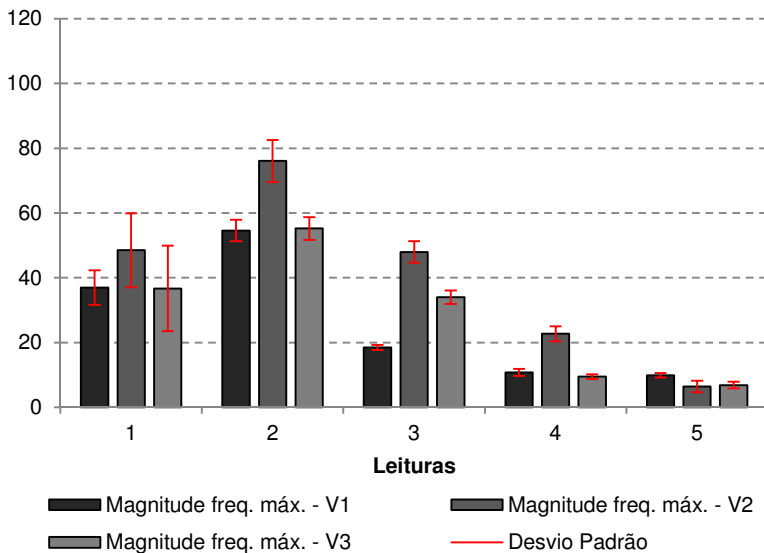
Figura 6.13: Magnitude da frequência máxima nas três vigas - 0 a 1600 μ s - a) Posição 1; b) Posição 2



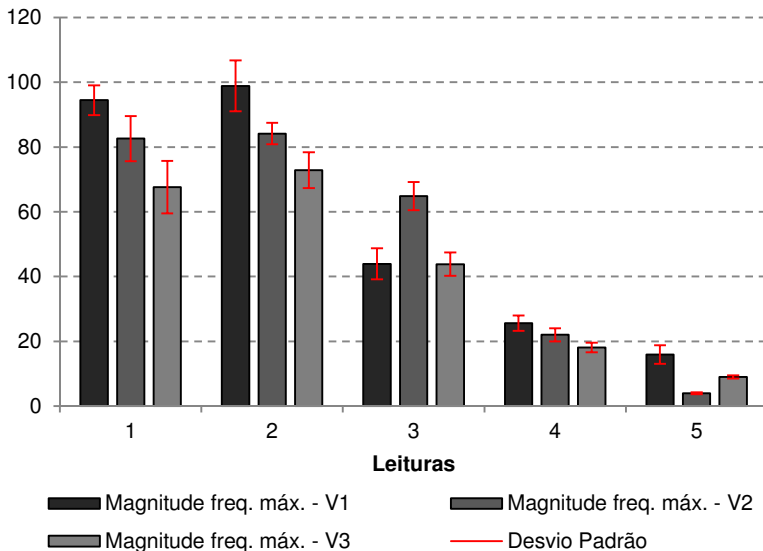


(b)

Figura 6.14: Magnitude da frequência máxima nas três vigas - 0 a 500 μ s - a) Posição 1; b) Posição 2



(a)



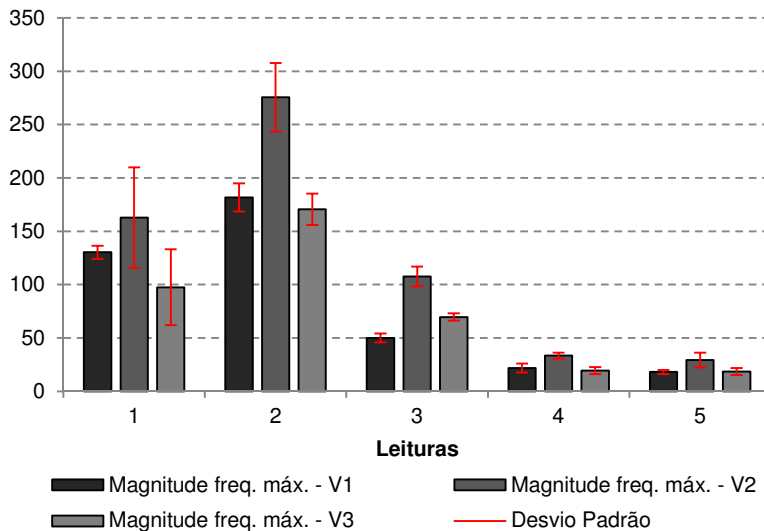
(b)

Figura 6.15: Magnitude da frequência máxima nas três vigas - t_{pulso} a 1600 μs - a) Posição 1; b) Posição 2

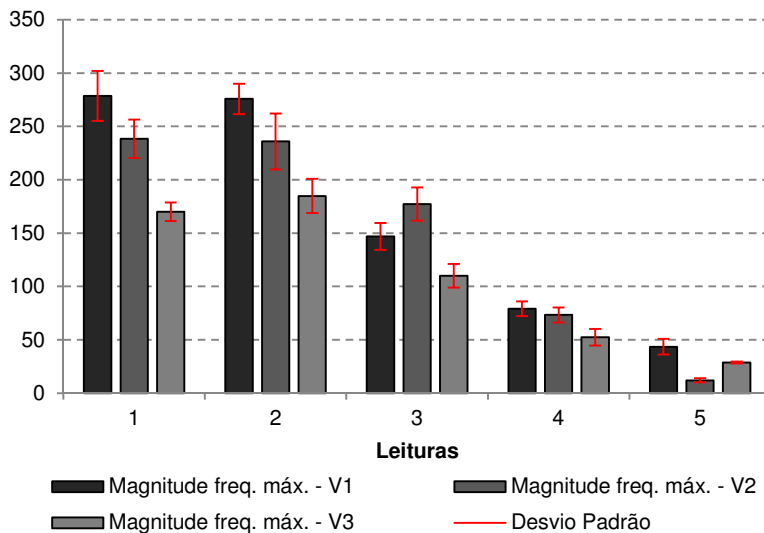
Nestes três intervalos de tempo (0 a 1600 μs , 0 a 500 μs e t_{pulso} a 1600 μs), na posição 1 (Figura 6.13-a, 6.14-a e 6.15-a), o aparecimento de fissuras foi percebido em todos os casos. Os estágios de fissuração também foram detectados, exceto na viga 1 que, em todos os intervalos, não apresentou grande variação entre as leituras 4 e 5. Com isso, um novo potencial parâmetro de análise mostra-se presente, o qual ainda não foi utilizado pelos estudiosos da área.

Novamente, a leitura 2 trouxe resultados maiores do que a leitura 1, com desvios padrão altos, assim como ocorreu nos parâmetros de energia, expondo a provável influência do acoplamento também na magnitude da frequência máxima. Porém, como a maioria dos parâmetros considerados sensíveis à fissuração demonstraram esta tendência na posição 1, atenta-se para a possibilidade de interferência da carga imposta durante a leitura longitudinal da viga ainda sã. Para melhor avaliação desta possível interferência, seria necessário um maior número de leituras anteriores ao início da fissuração, a fim de avaliar como os resultados se comportam com o aumento gradativo do carregamento imposto.

A magnitude da frequência máxima do intervalo “ t_{pulso} a $500 \mu\text{s}$ ” é apresentada na Figura 6.16.



(a)



(b)

Figura 6.16: Magnitude da frequência máxima nas três vigas - t_{pulso} a $500 \mu\text{s}$ - a) Posição 1; b) Posição 2

Na última janela de tempo avaliada, como mostra a Figura 6.16-a, a redução esperada dos valores obtidos entre as leituras 4 e 5 foi aparentemente pequena. Entretanto, como as demais leituras seguem a tendência dos outros três intervalos analisados, optou-se, previamente, por não descartar este último.

Já na segunda posição de análise, nos quatro intervalos (Figura 6.13-b até Figura 6.16-b), os resultados foram visualmente melhores do que na posição 1. Não houve outro tipo de anomalia nas sequências apresentadas, exceto a ocorrência de leituras 2 com valores maiores do que as leituras 1, em alguns casos. Isto traz a possibilidade de interferência da carga imposta também durante a leitura indireta, na posição 2.

6.2.4 Comparação de eficiência entre os parâmetros

A comparação dos resultados é iniciada pela análise visual do estado de fissuração das vigas, com o intuito de facilitar a interpretação dos dados obtidos. Não foram utilizadas técnicas para mensurar a fissuração existente, pois, neste estudo pioneiro, o intuito não foi correlacionar a área fissurada com os resultados do ultrassom. Esta análise, caso possível, deverá ser realizada em estudos futuros, com a utilização de diferentes materiais, para validação da hipótese. Neste momento, buscou-se analisar a evolução da fissuração e a resposta dos parâmetros de ultrassom em função desta evolução, com o objetivo de verificar a sensibilidade de cada um destes parâmetros ao longo do ensaio.

Nas duas primeiras leituras nenhuma das vigas apresentou fissuras. As demais leituras e os respectivos estados de fissuração estão na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Estado de fissuração das vigas - análise visual

Leitura	Viga 1	Viga 2	Viga 3
3	2 fissuras de espessura reduzida até em torno da linha neutra	1 fissura de espessura reduzida até em torno da linha neutra	2 fissuras de espessura reduzida até em torno da linha neutra
4	2 fissuras de espessura reduzida que ultrapassam a linha neutra	4 fissuras de espessura média ultrapassando a linha neutra	3 fissuras de espessura média ultrapassando a linha neutra e 1 fissura de espessura reduzida
5	2 fissuras de maior espessura até próximo ao topo	4 fissuras de maior espessura até próximo ao topo	4 fissuras de maior espessura até próximo ao topo

Os parâmetros válidos nesta análise comparativa, e que, portanto, demonstraram-se sensíveis à fissuração em cada estágio de leitura, são: velocidade de pulso, energia inicial, energia total e magnitude da frequência máxima nos quatro intervalos de tempo avaliados.

Utilizando estes parâmetros, traçou-se um gráfico comparativo para cada uma das vigas, em suas duas posições de leitura. No eixo das abcissas, foi plotada a porcentagem da carga média no momento de cada leitura em função da carga de ruptura. No eixo das ordenadas, utilizou-se a porcentagem da leitura de cada parâmetro, nos diferentes estágios avaliados, em função da leitura inicial, na viga sem danos. Como as leituras 1 e 2 refletiam o estágio não fissurado do elemento, estas não foram utilizadas no gráfico. Fez-se somente o uso de uma linha (vermelha), correspondente aos 100% dos valores de cada parâmetro, obtidos na leitura 1(viga sã), como base comparativa das demais leituras.

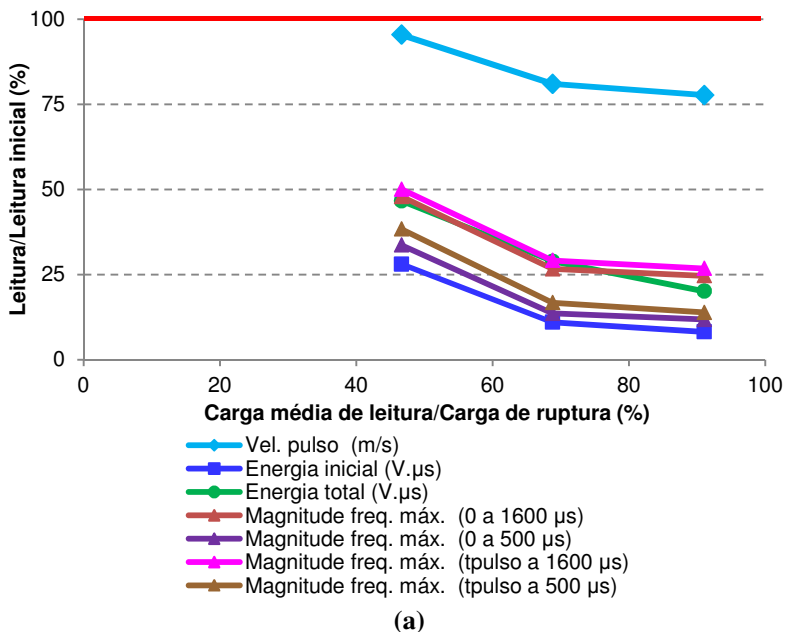
O desvio padrão não foi plotado nos gráfico para facilitar a visualização. Somente nas leituras 1 e 2, a variabilidade de resultados foi maior. As demais leituras, em geral, apresentaram baixo desvio padrão, fazendo com que a simples análise das médias seja de adequado resultado comparativo.

Logo após apresentação dos gráficos comparativos, em cada viga, é exibido um quadro resumo, onde são expostas as reduções obtidas pelos diferentes parâmetros, nas duas posições, e onde é apresentado o estado de fissuração do elemento, obtido pela análise visual.

Em cada viga, a análise dos resultados é iniciada pela posição 1, onde todas as leituras são avaliadas. Continua-se a discussão dos dados obtidos pela posição 2, novamente contemplando todas as leituras, e, finaliza-se com a comparação de ambas as posições.

6.2.4.1 Viga 1

Os comparativos dos resultados de ambas as posições para a viga 2 são exibidos na Figura 6.17.



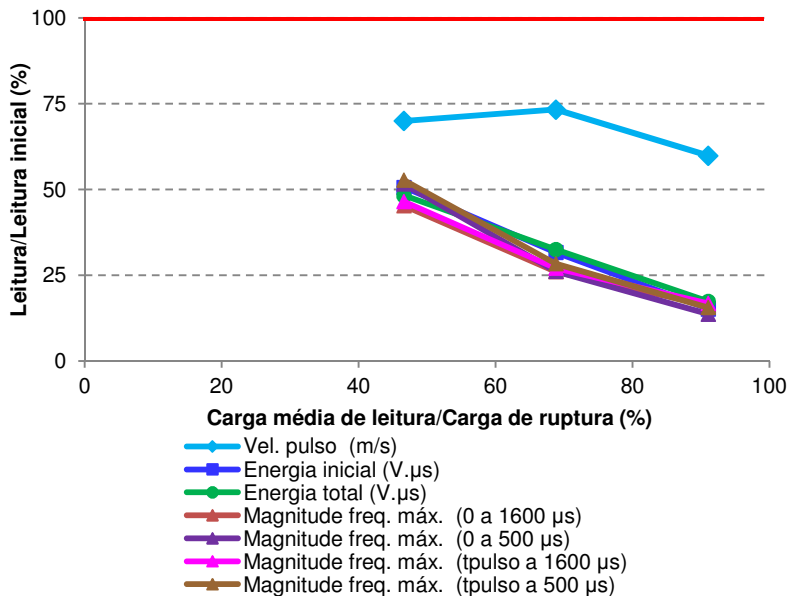


Figura 6.17: Comparação entre parâmetros válidos - Viga 1 - a) Posição 1; b) Posição 2

Tabela 6.6: Estado de fissuração (análise visual) e resultados do ultrassom nas três leituras - Viga 1

Redução em função da viga sã (%)	Leitura 3		Leitura 4		Leitura 5		
Estado de fissuração	2 fissuras reduzidas até linha neutra		2 fissuras reduzidas ultrapassam a linha neutra		2 fissuras maiores até o topo		
Parâmetros	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	
Velocidade de pulso	5%	30%	19%	27%	22%	40%	
Energia inicial	72%	49%	89%	68%	92%	85%	
Energia total	53%	52%	71%	68%	80%	83%	
M.F.M.*	(0-1600µs)	52%	55%	73%	74%	75%	84%
	(0-500µs)	66%	48%	86%	74%	88%	86%
	(t_{pulso} -1600µs)	50%	53%	71%	73%	73%	83%
	(t_{pulso} -500µs)	62%	47%	83%	72%	86%	84%

*Magnitude da frequência máxima

Na posição 1 (Figura 6.17-a), aos 47% da carga de ruptura, onde já havia ocorrido o início da fissuração (leitura 3), a redução dos valores dos diversos parâmetros foi variada. A velocidade de pulso apresentou redução de apenas 5%, que, considerada a variabilidade do ensaio de ultrassom, não pode ser caracterizada como sensível à fissuração. Os demais parâmetros exibiram quedas maiores a 50%, chegando a 72% de diminuição apontada pela energia inicial.

Entre as leituras 3 e 4, a viga 1 não apresentou importante aumento de fissuras. A redução exibida entre estas leituras por todos os parâmetros foi semelhante, entre 14% e 21%. Desta maneira, percebe-se que, o crescimento das fissuras foi detectado por todos os parâmetros.

Entre as leituras 4 e 5, apesar da quantidade de fissuras permanecer semelhante, as aberturas sofreram aumento. No entanto, praticamente todos os parâmetros apresentaram redução de somente 2% a 9% entre ambas as leituras.

Analisando o estado de fissuração do elemento na leitura imediatamente anterior à ruptura, aos 90% da carga, percebe-se que a velocidade de pulso foi apenas 22% menor do que a obtida na viga sã. Enquanto isso, os demais parâmetros apresentaram decréscimo entre 73% e 92%, sendo este último o caso da energia inicial.

Assim, considera-se que, na posição 1, o parâmetro mais sensível foi a energia inicial, que mostrou importantes reduções em função do aumento de fissuras. Em seguida, tem-se as magnitudes das frequências máximas dos intervalos limitados a 500 μ s, evidenciando que os melhores resultados no domínio da frequência, nesta posição, são obtidos em uma janela de tempo de análise menor.

Na posição 2 (Figura 6.17-b), apesar da velocidade de pulso exibir redução de 30% já na terceira leitura, em sua subsequente esta variação foi positiva, ou seja, a velocidade de pulso apresentou acréscimo, estando contrário ao esperado. Como o desvio padrão não exibiu valores altos nas leituras 3 e 4, entende-se que este parâmetro não foi sensível à fissuração neste caso.

Os demais parâmetros apresentaram redução semelhante entre as leituras, com variação praticamente linear. Os decréscimos em todos os parâmetros, exceto na velocidade de pulso, foram em torno de 48% e 55% entre a viga sã e a leitura 3, de 19% a 26% entre as leituras 3 e 4, e de 16 a 26% entre as leituras 4 e 5. Com isso, todos estes exibiram redução de 83% a 86% entre a viga sem danos e imediatamente anterior ao rompimento. Assim, mostraram-se analogamente sensíveis ao estado de fissuração do elemento.

Fazendo-se uma comparação entre os resultados das posições 1 e 2, é possível identificar que, na leitura 3, as reduções exibidas por alguns parâmetros foram semelhantes em ambas as posições, exceto na energia inicial e nas magnitudes das frequências máximas limitadas a $500\mu\text{s}$, onde o decréscimo apresentado foi menor na posição 2. Estes foram os parâmetros encontrados como mais sensíveis na posição 1, porém, na posição 2, se equiparam à sensibilidade dos demais. Assim, ambas as posições foram adequadas à detecção do início da fissuração, sendo a primeira posição mais favorável para alguns parâmetros.

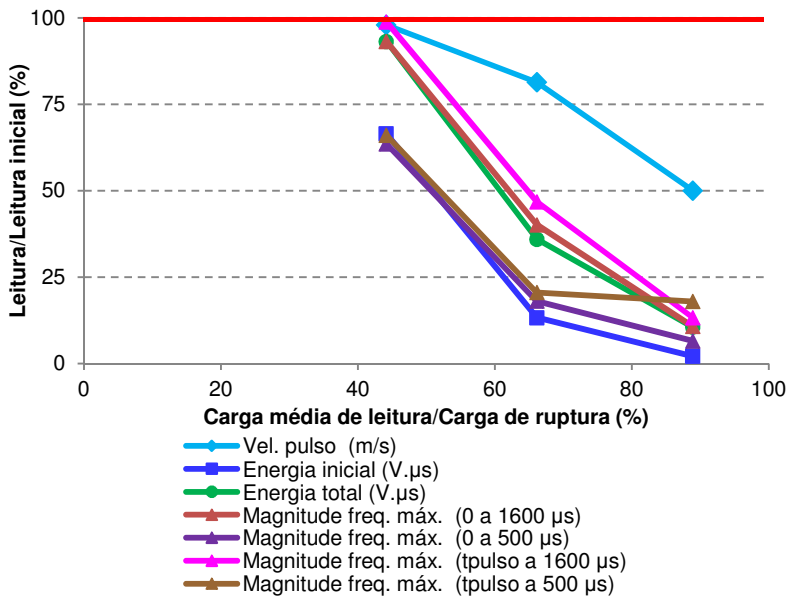
Entre as leituras 3 e 4, as reduções dos parâmetros em ambas as posições foram muito próximas. Na posição 2, a variação entre as leituras 4 e 5 foi maior do que na posição 1 em todos os parâmetros. Com isso, diz-se que, provavelmente, esta posição, onde as fissuras estão contidas no caminho por onde a onda se propaga, foi mais favorável na detecção do aumento da abertura das fissuras.

Por fim, na leitura 5, novamente as reduções dos parâmetros em ambas as posições foram muito próximas. No entanto, as magnitudes das frequências máximas limitadas a $1600\mu\text{s}$ mostraram-se ligeiramente mais eficientes na posição 2.

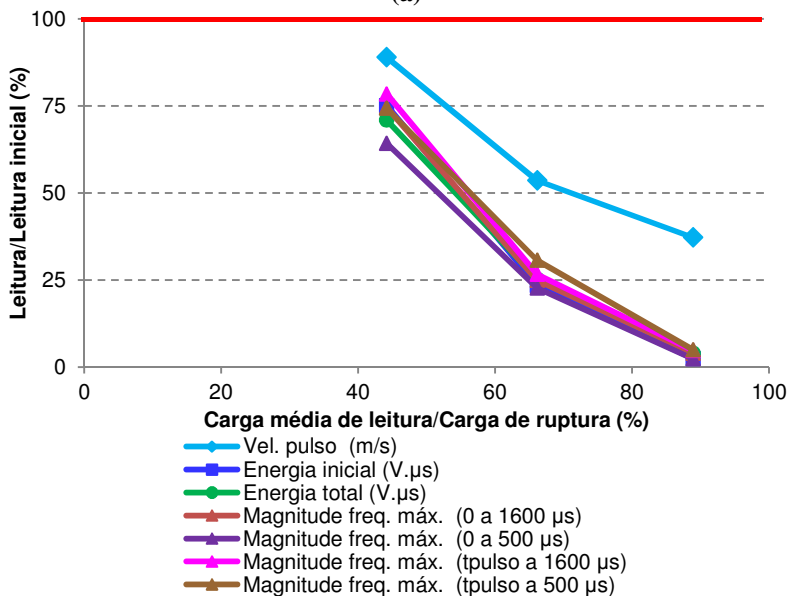
Desta maneira, na viga 1, baseando-se nos estágios de fissuração atingidos, identifica-se que, na posição 2, os resultados foram mais coerentes com o estado de fissuração obtido pela análise visual. Considerando esta posição como a de melhor utilização, diz-se que todos os parâmetros apresentaram sensibilidade semelhante, exceto a velocidade de pulso, e com ligeiro destaque para a energia inicial.

6.2.4.2 Viga 2

Os comparativos dos resultados de ambas as posições para a viga 2 estão presentes na Figura 6.18.



(a)



(b)

Figura 6.18: Comparação entre parâmetros válidos - Viga 2 - a) Posição 1; b) Posição 2

Tabela 6.7: Estado de fissuração (análise visual) e resultados do ultrassom nas três leituras - Viga 2

Redução em função da viga sã (%)	Leitura 3		Leitura 4		Leitura 5		
Estado de fissuração	1 fissura reduzidas até linha neutra		4 fissuras médias ultrapassam a linha neutra		4 fissuras maiores até o topo		
Parâmetros	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	
Velocidade de pulso	2%	11%	19%	46%	50%	63%	
Energia inicial	35%	25%	87%	76%	98%	98%	
Energia total	7%	29%	64%	75%	89%	96%	
M.F.M.*	(0-1600 μ s)	7%	25%	60%	75%	89%	96%
	(0-500 μ s)	36%	36%	82%	77%	93%	98%
	(t_{pulso} -1600 μ s)	1%	21%	53%	73%	87%	95%
	(t_{pulso} -500 μ s)	34%	26%	80%	69%	82%	95%

*Magnitude da frequência máxima

Na posição 1, exibida na Figura 6.18-a, com 44% da carga de ruptura, na leitura 3, realizada logo após o início da fissuração, houve dois patamares de redução, de 1% a 7% e de 34% a 36%. A velocidade de pulso e a magnitude da frequência máxima do intervalo de t_{pulso} a 1600 μ s estiveram no primeiro patamar, com até 2% de decréscimo, juntamente com a energia total e a magnitude da frequência máxima do intervalo de 0 a 1600 μ s, com 7% de redução. Assim, todos estes apresentaram em um nível de sensibilidade duvidoso ao aparecimento de fissuras, que pode ser confundido com a variabilidade característica do ensaio de ultrassom. As demais magnitudes das frequências máximas (0 a 500 μ s e t_{pulso} a 500 μ s) e a energia inicial, por outro lado, demonstraram-se sensíveis ao início da fissuração, enquadrando-se no segundo patamar citado, com reduções em torno de 35%.

Entre as leituras 3 e 4, a viga 2 apresentou importante aumento de fissuras, como mostrou a Tabela 6.5. A redução exibida por todos os parâmetros entre estas leituras foi semelhante, de 46% a 57%, exceto a velocidade de pulso que decresceu apenas 17%. Desta maneira, percebe-se que, o crescimento das fissuras foi detectado por todos os parâmetros, porém, com sensibilidade reduzida na velocidade de pulso.

No intervalo das leituras 4 e 5, a quantidade de fissuras permaneceu semelhante, apenas com aumento das aberturas. A magnitude da frequência máxima do intervalo de t_{pulso} a 500 μ s exibiu

redução de apenas 2%, enquanto os demais parâmetros apresentaram decréscimo de 11% a 31%.

Fazendo-se a análise do elemento desde o início do ensaio, no estado não fissurado, até aos 90% da carga de ruptura, percebe-se que a velocidade de pulso decresceu em torno de 50%, enquanto as demais apresentaram redução entre 82% e 98%.

Assim, evidencia-se que todos os parâmetros detectaram o importante aumento de fissuras ocorrido entre as leituras 3 e 4 (com resultados menos sensíveis na velocidade de pulso), e seu comportamento posterior. Porém, somente a energia inicial e as magnitudes das frequências máximas limitadas a 500 μ s detectaram o estado de fissuração do elemento desde o seu início. Além disso, a energia inicial e a magnitude da frequência máxima do intervalo de 0 a 500 μ s mostraram-se mais sensíveis ao estado de fissuração final, com reduções de 98% e 93%, respectivamente. Desta maneira, estes parâmetros (energia inicial e magnitudes das frequências máximas limitadas a 500 μ s) destacam-se em eficiência na posição 1.

Enquanto isso, na posição 2 (Figura 6.18-b), novamente a velocidade de pulso foi o parâmetro que exibiu menor redução entre uma leitura e outra. O decréscimo foi de 11% entre o obtido na viga sã e na leitura 3, de 35% entre as leituras 3 e 4, e de 17% entre as leituras 4 e 5, totalizando uma redução de 63% entre o início do ensaio e aos 90% da carga de ruptura.

Mais uma vez, os demais parâmetros apresentaram redução semelhante entre as leituras. A diminuições obtidas entre os resultados da viga sã e da leitura 3 foram entre 21% e 36%. A redução entre as leituras 3 e 4 foi entre 35% e 52%, e entre as leituras 4 e 5 foi de 17% a 26%. A redução entre a leitura inicial e a leitura 5 foi de 95% a 98%.

Realizando a comparação entre os resultados de ambas as posições, percebe-se que, na leitura 3, na posição 1, as reduções de energia inicial e das magnitudes das frequências máximas limitadas a 500 μ s foram iguais ou ligeiramente melhores do que na posição 2. Contudo, os outros parâmetros, que não haviam trazido bons resultados na posição 1, exceto a velocidade de pulso, mostraram-se analogamente sensíveis aos demais com relação ao início da fissuração na posição 2. Assim, a posição 2 mostrou-se mais adequada à detecção do início da fissuração por alguns parâmetros. Porém, ambas as posições foram satisfatórias para a energia inicial e a magnitude da frequência máxima de 0 a 500 μ s, que já haviam se destacado na posição 1.

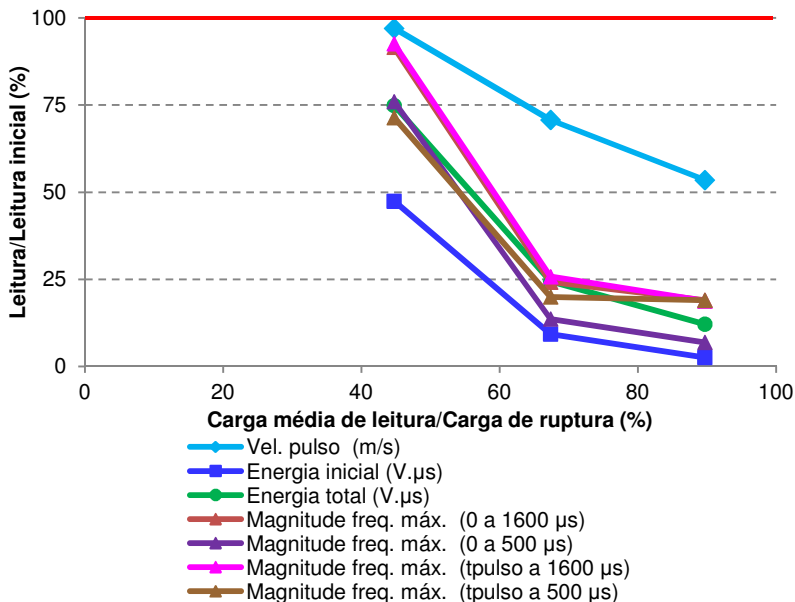
Entre as leituras 3 e 4, as reduções dos parâmetros nas duas posições foram muito próximas. Já entre as leituras 4 e 5, o

comportamento ocorrido foi contrário ao visualizado na leitura 3. Assim, na posição 1, as reduções de energia inicial e das magnitudes das frequências máximas limitadas a 500 μ s foram ligeiramente menores do que na posição 2. Os outros parâmetros, que haviam trazido maiores reduções na posição 1, mostraram-se analogamente sensíveis aos demais com relação ao aumento das aberturas das fissuras na posição 2.

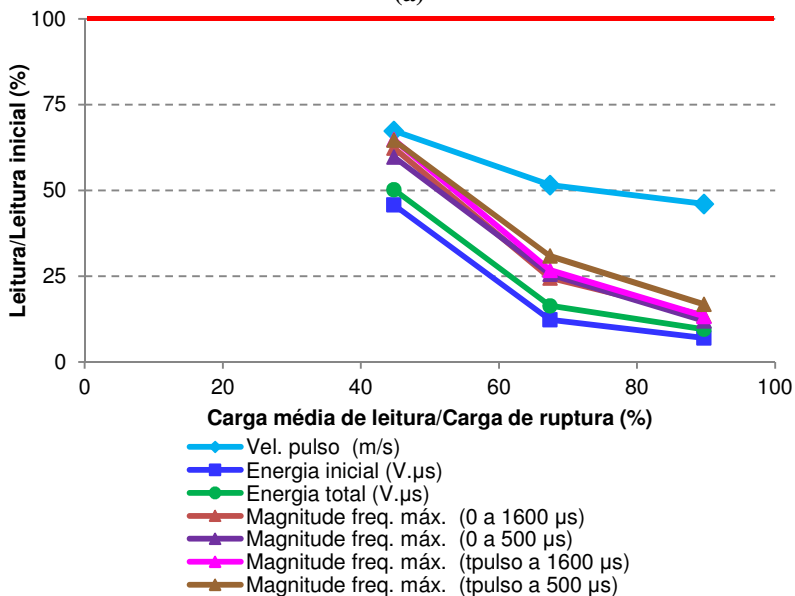
Na leitura 5, novamente os decréscimos dos parâmetros nas duas posições foram muito próximos, porém, ligeiramente maiores na posição 2. Com isso, na viga 2, baseando-se nos estágios de fissuração atingidos, percebe-se que, na posição 2, os resultados foram mais coerentes com o estado de fissuração obtido pela análise visual. Considerando esta posição como a de melhor utilização, diz-se que todos os parâmetros mostraram-se analogamente sensíveis, com exceção da velocidade de pulso, e, destacando-se novamente a energia inicial e também a magnitude da frequência máxima do intervalo de 0 a 500 μ s.

6.2.4.3 Viga 3

Os gráficos comparativos dos resultados de ambas as posições para a viga 3 são expostos na Figura 6.19.



(a)



(b)

Figura 6.19: Comparação entre parâmetros válidos - Viga 3 - a) Posição 1; b) Posição 2

Tabela 6.8: Estado de fissuração (análise visual) e resultados do ultrassom nas três leituras - Viga 3

Redução em função da viga sã (%)	Leitura 3		Leitura 4		Leitura 5		
Estado de fissuração	2 fissuras reduzidas até linha neutra		3 fissuras médias ultrapassam linha neutra e 1 fissura reduzida		4 fissuras maiores até o topo		
Parâmetros	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	
Velocidade de pulso	3%	33%	29%	48%	47%	54%	
Energia inicial	53%	54%	91%	88%	97%	93%	
Energia total	25%	50%	76%	84%	88%	90%	
M.F.M.*	(0-1600 μ s)	8%	38%	76%	75%	81%	86%
	(0-500 μ s)	24%	40%	86%	74%	93%	88%
	(t_{pulso} -1600 μ s)	7%	35%	74%	73%	81%	87%
	(t_{pulso} -500 μ s)	29%	35%	80%	69%	81%	83%

*Magnitude da frequência máxima

Iniciando a análise comparativa dos resultados da viga 3 pela posição 1 (Figura 6.19-a), aos 44% da carga de ruptura, na leitura 3, com o elemento já fissurado, a redução dos valores dos diversos parâmetros foi variada. A velocidade de pulso apresentou redução de apenas 3%, e as magnitudes das frequências máximas limitadas a 1600 μ s exibiram quedas de até 8%. Novamente, considerada a variabilidade do ensaio, estes resultados não podem ser caracterizados como sensíveis à fissuração. A energia inicial apresentou redução de 53%, e os demais parâmetros exibiram quedas de 24% a 29%.

Entre as leituras 3 e 4, o aumento de fissuras na viga 3 foi significativo. A redução exibida pelos parâmetros entre estas leituras foi variável. O decréscimo foi de 26% na velocidade de pulso, de 67% e 68% nas magnitudes das frequências máximas limitadas a 1600 μ s, de 38% na energia inicial, e de 51% a 62% nos demais parâmetros. Percebe-se pelo gráfico da Figura 6.19-a, que os parâmetros que não haviam detectado o início da fissuração, apresentaram um decréscimo maior entre as leituras 3 e 4, atingindo um patamar semelhante aos demais na leitura 4.

Entre as leituras 4 e 5, apesar da quantidade de fissuras permanecer semelhante, as aberturas sofreram aumento. No entanto, praticamente todos os parâmetros apresentaram redução de somente 1%

a 12% entre ambas as leituras, exceto a velocidade de pulso que exibiu queda de 18%.

Analisando o estado de fissuração do elemento na leitura imediatamente anterior à ruptura, aos 90% da carga, percebe-se que a velocidade de pulso foi 47% menor do que a obtida na viga sã. Enquanto isso, os demais parâmetros apresentaram decréscimo entre 81% e 97%, com destaques para a energia inicial e a magnitude da frequência máxima de 0 a 500 μ s, com as maiores porcentagens de diminuição, 97% e 93%, respectivamente.

Assim, percebe-se que todos os parâmetros detectaram o importante aumento de fissuras ocorrido entre as leituras 3 e 4 (com resultados menos sensíveis na velocidade de pulso), e seu comportamento posterior. No entanto, somente as energias inicial e total, e as magnitudes das frequências máximas limitadas a 500 μ s detectaram o estado de fissuração do elemento desde o seu princípio. Aliado a isso, como já avaliado, a energia inicial e a magnitude da frequência máxima do intervalo de 0 a 500 μ s mostraram-se mais sensíveis ao estado de fissuração final. Salienta-se, porém, que a energia inicial exibiu redução maior entre a leitura inicial (viga sã) e leitura 3 do que entre as leituras 3 e 4, onde o crescimento de fissuras foi maior. Assim, a magnitude da frequência máxima do intervalo de 0 a 500 μ s foi o parâmetro que se destacou em eficiência na posição 1.

Na posição 2 (Figura 6.19-b), os parâmetros dividiram-se em três comportamentos. A velocidade de pulso exibiu desempenho distinto dos demais, as energias inicial e total apresentaram comportamentos semelhantes, e os outros parâmetros (magnitudes das frequências máximas) demonstraram um terceiro padrão de redução.

Na leitura 3, a redução apresentada pela velocidade de pulso, em função do resultados obtidos para a viga sã, foi de 33%. O segundo grupo, composto pelas energias, exibiu decréscimo em torno de 50% e 54%. Já as magnitudes das frequências máximas sofreram queda de 35% a 40%.

Entre as leituras 3 e 4, a velocidade de pulso apresentou decréscimo de apenas 15%, enquanto os demais parâmetros exibiram queda de 34% a 38%. Já entre as leituras 4 e 5, a redução de velocidade foi de 6%, das energias foi de 5% e 6%, e das magnitudes das frequências máximas foi de 11% a 14%. Com isso, a redução obtida entre o estado sã da viga e o fissurado, correspondente à quinta leitura, foi de 54% para a velocidade de pulso, 90% e 93% para as energias e de 83% a 88% para as magnitudes das frequências máximas.

Fazendo-se uma comparação entre os resultados das posições 1 e 2, identifica-se que, na leitura 3, a energia inicial mostrou resultados semelhantes em ambas as leituras, sendo, portanto, sensível nas duas posições. Porém, os demais parâmetros exibiram maiores reduções na posição 2, inclusive a velocidade de pulso e as magnitudes limitadas a 1600 μ s, as quais não haviam identificado o início da fissuração na posição 1. Desta maneira, a posição 2 novamente mostrou-se mais apropriada para a detecção do início da fissuração por alguns parâmetros.

Entre as leituras 3 e 4, na posição 1, a velocidade de pulso mostrou-se mais sensível do que na segunda posição. Além disso, baseando-se no elevado crescimento de fissuras neste estágio, se comparado à leitura 3, identifica-se que, na posição 1, os parâmetros descrevem melhor este comportamento, pois a redução entre as leituras é mais acentuada.

Entre as leituras 4 e 5, em ambas as posições, os parâmetros apresentaram reduções semelhantes e de baixo valor, evidenciando, igualmente, o pouco crescimento de fissuras. Na leitura 5, novamente os resultados foram semelhantes nas duas posições, o que reitera que o estado mais crítico de fissuração anterior à ruptura é detectado por todos os parâmetros analogamente, exceto pela velocidade de pulso.

Diante dos resultados expostos e discutidos da viga 3, baseando-se nos estágios de fissuração atingidos, percebe-se que, ao contrário das demais vigas, na posição 1, os resultados foram ligeiramente mais coerentes com o estado de fissuração obtido pela análise visual. No entanto, o início da fissuração foi identificado por alguns parâmetros somente na posição 2. Assim, conclui-se que a posição mais favorável, neste caso, depende do parâmetro analisado.

6.2.4.4 Considerações gerais sobre os parâmetros que mostraram sensibilidade à fissuração

Numa análise geral de todos os parâmetros comparados no item 6.2.4, a velocidade de pulso foi visivelmente menos eficiente do que os demais, não detectando, na maioria das vezes, o início da fissuração na posição longitudinal.

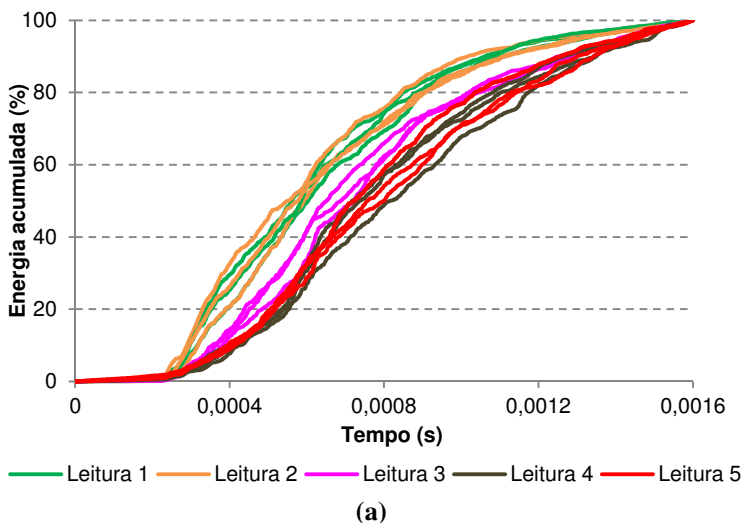
Além disso, comparando-se as reduções obtidas pelos diferentes parâmetros aos 60% de carga, onde a carga de serviço já foi provavelmente atingida, percebe-se que novamente a velocidade de pulso mostrou desvantagem em relação aos demais parâmetros. A fissuração é detectada visivelmente, e em todos os casos, a velocidade

de pulso, exibe redução em torno de 15% a 40%, enquanto os outros parâmetros decrescem, aproximadamente, de 35% a 80%.

Assim, percebe-se que, em geral, a sensibilidade obtida pelos parâmetros do formato da onda de ultrassom, foi significativamente maior do que a da velocidade de pulso, mostrando a importância da análise do formato de onda para uma avaliação mais precisa e eficiente do estado de fissuração do elemento.

6.2.5 Energia acumulada

Para facilitar a visualização das curvas de energia acumulada para as três vigas, fez-se uma comparação entre os resultados das leituras para as posições 1 e 2 na Figura 6.20-a e Figura 6.20-b, respectivamente.



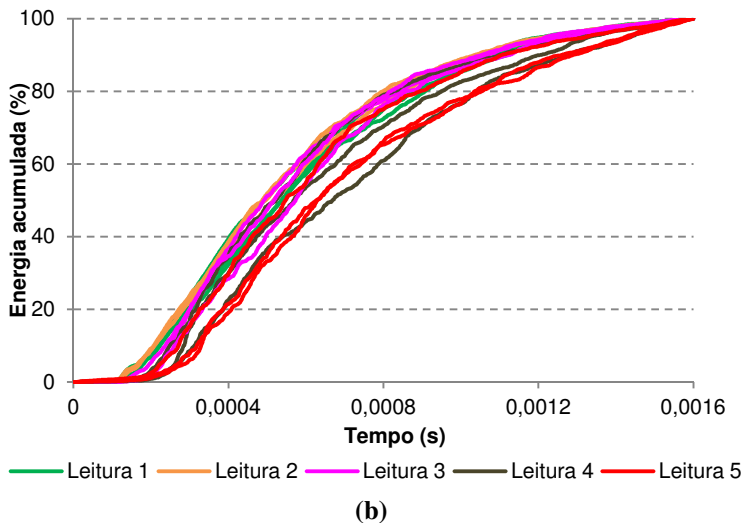


Figura 6.20: Comparação da energia acumulada em todas as vigas- a) Posição 1; b) Posição 2

Percebe-se que, na posição 1 (Figura 6.20-a), as curvas verde e laranja, correspondentes à primeira e segunda leituras das três vigas, são praticamente coincidentes. Assim, denotam o estado ainda não fissurado dos elementos.

A curva em rosa refere-se à terceira leitura, exibindo a energia acumulada do início da fissuração dos elementos, com inclinação visivelmente maior do que as anteriores. Isso ocorre porque, como já avaliado nas placas, nos tempos iniciais, em materiais sem danos, as amplitudes da onda são maiores, aumentando o valor da energia acumulada, e conseqüentemente, sua inclinação. Já nos materiais fissurados as amplitudes são menores desde o início, fazendo com que a energia se acumule mais gradativamente ao longo do tempo.

As curvas relativas à quarta e quinta leituras apresentam inclinação menor do que a leitura 3, demonstrando que foi perceptível o aumento da fissuração. No entanto, as duas se sobrepõem parcialmente, deixando dúvida quanto à sensibilidade deste parâmetro na avaliação de fissuras maiores.

Já na posição 2 de leitura (Figura 6.20-a), as curvas se sobrepõem excessivamente, sendo visivelmente perceptível que os resultados não são favoráveis para detecção de fissuras. Portanto, neste sentido de leitura, a energia acumulada não se mostrou um bom parâmetro de análise.

7. CONSIDERAÇÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Os objetivos desta dissertação basearam-se na possibilidade de ampliação do uso da técnica de ultrassom, através da definição e aplicação de parâmetros obtidos pelo formato da onda que se propaga pelo material.

Para isso, uma pesquisa bibliográfica foi inicialmente realizada, a fim de buscar métodos para avaliar o formato da onda de ultrassom. Alguns estudos internacionais foram encontrados, e a partir deles, delimitou-se uma metodologia a ser praticada. Os parâmetros de análise foram definidos, e a partir disto, buscou-se a implementação destes parâmetros na avaliação de fissuras de retração plástica em placas de concreto e de argamassa, e de fissuras de flexão em vigas de concreto armado.

A velocidade de pulso foi utilizada paralelamente aos novos parâmetros, com o intuito de avaliar e comparar a eficiência dos mesmos. As conclusões destes estudos foram divididas em itens, referentes à fissuração por retração plástica e à fissuração por flexão. Alguns comentários gerais sobre os resultados da pesquisa são apresentados, e, por fim, foram incluídas recomendações para trabalhos futuros.

7.1 FISSURAÇÃO POR RETRAÇÃO PLÁSTICA

Formatos de onda foram obtidos nas duas direções das placas de concreto, e em apenas uma nas placas de argamassa. Nove parâmetros foram analisados em cada uma destas direções: velocidade de pulso, velocidade de grupo, amplitude máxima, energia inicial, energia total, energia acumulada, magnitude e frequência máximas, e frequência central.

Os resultados demonstraram que o pico de frequência máxima não se mostrou sensível à fissuração existente em nenhum dos casos. Todos os demais parâmetros mostraram-se adequados a este tipo de análise na placa de argamassa, e nas leituras realizadas na direção perpendicular à extensão das fissuras (de 21 a 32) na superfície da placa de concreto. Porém, na outra direção de leituras (de 1 a 20) da placa de concreto, paralelas às fissuras, alguns parâmetros não se mostraram sensíveis para detecção da fissuração ocorrida. Isso faz com que se perceba a importância do cruzamento de fissuras pela onda de ultrassom, especialmente nas de menor porte, tais como as de retração plástica.

Os comparativos entre os resultados dos diferentes parâmetros demonstraram que, utilizando a análise estatística da variância, pode-se encontrar diferentes níveis de confiabilidade na utilização dos parâmetros para detecção da fissuração.

A velocidade de pulso esteve entre os parâmetros mais sensíveis nas placas de concreto, porém nas placas de argamassa foi ligeiramente menos eficiente. Já a velocidade de grupo, demonstrou menor eficiência em uma das direções de leitura (21 a 32) das placas de concreto. A amplitude máxima teve a sensibilidade reduzida nas placas de argamassa.

Assim, diante dos ótimos resultados dos demais parâmetros, pode-se dizer que estes três - velocidade de pulso, amplitude máxima e velocidade de grupo - estariam em um patamar de confiança inferior para esta análise de retração plástica.

Os parâmetros de frequência (magnitude da frequência máxima e frequência central) mostraram-se muito sensíveis à fissuração existente, especialmente nas placas de argamassa e na direção transversal às fissuras nas placas de concreto. Os parâmetros de energia também se apresentaram entre os mais sensíveis nas avaliações realizadas, destacando-se a energia inicial, com excelentes resultados inclusive na direção paralela às fissuras. A energia acumulada, avaliada separadamente, apresentou-se também como um ótimo parâmetro de análise da fissuração por retração plástica.

7.2 FISSURAÇÃO POR FLEXÃO

Optou-se, para as vigas, por avaliar um número maior de intervalos de tempo para analisar os parâmetros no domínio da frequência. Além do intervalo empregado nas placas, de 0 a 1600 μ s, outros três foram acrescentados, de 0 a 500 μ s, de t_{pulso} a 1600 μ s e de t_{pulso} a 500 μ s. Com isso, totalizaram-se dezoito parâmetros avaliados.

Em uma análise inicial do comportamento esperado nas diferentes leituras, os parâmetros velocidade de grupo, amplitude máxima, e frequências máximas e centrais de todos os intervalos não se mostraram sensíveis ao comportamento fissurado dos elementos. Assim, a análise comparativa dos resultados foi realizada com os demais parâmetros: velocidade de pulso, energia inicial, energia total e magnitude da frequência máxima nos quatro intervalos de tempo. A energia acumulada também foi avaliada, porém, não comparativamente.

Dois posições de obtenção dos formatos de onda foram utilizadas, uma longitudinalmente à viga, com os transdutores

posicionados de forma que o pulso se propagasse ao longo do comprimento das vigas, e uma segunda posição com os transdutores posicionados em faces opostas da viga, em transmissão indireta.

Os resultados obtidos em todas as vigas mostraram que a velocidade de pulso foi visivelmente menos eficiente do que os demais parâmetros, não detectando, na maioria das vezes, o início da fissuração na posição longitudinal.

Aliado a isso, em uma comparação realizada entre as reduções obtidas pelos diferentes parâmetros na porcentagem de carga onde a carga de serviço provavelmente já havia sido atingida, percebe-se que a velocidade de pulso apresentou redução muito menor do que os demais parâmetros. Entre os parâmetros que mais se destacam nesta análise realizada estão a energia e a magnitude da frequência máxima obtidas em um intervalo de tempo menor.

No que diz respeito às posições de leitura, percebe-se que a leitura onde foi utilizada a transmissão indireta (posição 2), em geral, mostrou-se ligeiramente mais favorável à detecção do real estado fissurado do elemento, devido às reduções, na maioria dos casos, mais coerentes com a fissuração visualizada.

A energia acumulada não se mostrou eficiente na detecção de fissuras de flexão na posição 2. Já na posição 1, esta apresentou sensibilidade ao início e aumento da fissuração em todas as vigas, porém trouxe resultados coincidentes entre as duas últimas leituras, mostrando-se, ainda, um parâmetro duvidoso na avaliação de fissuras de maior porte.

7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante de todos os resultados obtidos, conclui-se que, de modo geral, os parâmetros de frequência utilizados pelos pesquisadores citados nesta dissertação (frequências máxima e central) não apresentaram resultados relevantes, especialmente no caso das vigas. Já a magnitude da frequência máxima, acrescentada neste estudo, avaliada comparativamente em amostras sãs e outras danificadas, mostrou-se promissora na avaliação de fissuras.

Alguns parâmetros ainda demonstraram a necessidade de maiores estudos sobre a sua utilização, tais como a velocidade de grupo e a amplitude máxima.

A velocidade de pulso, apesar de já consolidada na avaliação de danos ocorrentes em elementos de concreto e argamassa, mostrou-se menos eficiente do que outros parâmetros avaliados neste estudo.

Assim, enfatiza-se a importância do emprego destes novos parâmetros, paralelamente à utilização da velocidade de pulso, os quais podem atentar para possíveis danos não detectados por ela.

Destaca-se o desempenho da energia, em especial da acumulada e da obtida em um intervalo de tempo menor (energia inicial). Ambas trouxeram bons resultados em praticamente todos os casos avaliados, mostrando-se como parâmetros de grande sensibilidade e de potencial uso na avaliação de fissuras de diferentes causas, em diversos tipos de materiais e formas.

7.4 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com este estudo inicial, estende-se a possibilidade de realização de muitos outros estudos, a fim de complementar e consolidar este novo tipo de análise do ultrassom. Dentre estes se destacam os listados a seguir:

- Implementação de uma rotina computacional capaz de facilitar a obtenção dos parâmetros do formato da onda de ultrassom;
- Avaliação dos resultados do ultrassom em vigas com diferentes níveis de carga anteriores ao início da fissuração, a fim de avaliar como estes se comportam com o aumento gradativo do carregamento imposto;
- União dos resultados dos parâmetros do ultrassom com a utilização de programa de imagem para obtenção do grau de fissuração/área superficial de fissuras, utilizando diferentes materiais na composição do concreto, com o intuito de validar a possibilidade de uma correlação de resultados;
- Construção de vigas com seção transversal e armaduras mais condizentes com a realidade de utilização para análise da interferência das armaduras nas leituras indiretas (semelhantes à posição 2 das vigas deste trabalho);
- Estudo da variação dos tempos limites empregados na análise das, aqui denominadas, energia inicial e energia total;
- Estudo da variação do intervalo de tempo utilizado para determinação da energia acumulada;
- Estudo dos resultados obtidos quando os parâmetros do aparelho de ultrassom são alterados: amplitude de saída, ganho no sinal recebido (amplificação) e tempo para exibição da curva;

- Avaliação da influência do efeito de borda em leituras com diferentes extensões percorridas pela onda.
- Avaliação de outras posições de leitura em vigas de concreto armado;
- Emprego prático dos novos parâmetros obtidos pelo formato da onda de ultrassom em estruturas reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 305R. **Hot Weather Concreting**. Manual of Concrete Practice, Part 2. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1999.

ACI COMMITTEE 228, **In-Place Methods to Estimate Concrete Strength**, American Concrete Institute, ACI 228.1R, 2003.

AGGELIS, D.G.; PHILIPPIDIS, T.P. Ultrasonic wave dispersion and attenuation in fresh mortar. **NDT&E International**, v. 37, p. 617–631, 2004.

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

AGGELIS, D.G.; MOMOKI, S; CHAI, H. Surface wave dispersion in large concrete structures. **NDT&E International**, v. 42, p.304–307, 2009.

AGGELIS, D.G.; TSINOPOULOS, S.V.; POLYZOS D. An iterative effective medium approximation (IEMA) for wave dispersion and attenuation predictions in particulate composites, suspensions and emulsions. **Acoustical Society of America**, v.116, n. 6, p.3443–3452, 2004.

AL-FADHALA, M.; HOVER, K.C. Rapid evaporation from freshly cast concrete and the gulf environment. **Construction and Building Materials**, v. 15, p. 1-7, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. (2007) Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro.

_____. **NBR 8802**: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1994.

BECKER, J.; JACOBS, L.J.; QU, J. Characterization of cement-based materials using diffuse ultrasound. **Journal of Engineering Mechanics**, v.129, n. 12, p. 1478–1484, 2003.

BRAILE, P. **Seismic wave demonstrations and animations.**

Disponível em:

<<http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/WaveDemo.htm>>.

Acesso em: 10/9/2013.

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

CALDAS, A. J. A. **Avaliação da abertura de fissuras de flexão em vigas de concreto armado.** São Paulo, 1997. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

CÂMARA, E. **Avaliação da resistência à compressão do concreto utilizado usualmente na Grande Florianópolis através de métodos de ensaios não destrutivos.** Florianópolis, 2006. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.

CHEEKE, J. D. N. **Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves.** Montreal: CRC Press, 2002.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Durable concrete structures: CEB design guide.** CEB Bulletin d'Information, n.182, 1992.

COWAN, M.L.; BEATY, K.; PAGE, J.H.; ZHENGYOU, L.; SHENG, P. Group velocity of acoustic waves in strongly scattering media: Dependence on the volume fraction of scatterers. **Physical Review E**, v.58, n. 5, p. 6626–6636, 1998.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em concreto armado.** Porto Alegre, 1988. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DAO, V.T.N.; DUX, P.F.; MORRIS, P.H.; O'MOORE, L. Plastic shrinkage cracking of concrete, **Australian Journal of Structural Engineering**, v. 10, n. 3, p. 207-213, 2010.

DORNELLES, F. L.; PINTO, R. C. A.; PADARATZ, I. J. **Influência do posicionamento da armadura em medições de ultrassom para avaliação da resistência à compressão do concreto,** Encontro

Nacional Betão Estrutural 2004, Actas, Porto, Portugal, p. 1015-1022, 2004.

EREN, Ö.; MARAR, K. Effect of Steel Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Normal and High Strength Concretes. **Materials Research**, v. 13, n. 2, p. 135-141, 2010.

GRAFF, K. F. **Wave Motion in Elastic Solids**. New York: Dover Publication, 1991.

HAUWAERT, A.V.; DELANNAY, F.; THIMUS, J.F. Cracking Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Revealed by Means of Acoustic Emission and Ultrasonic Wave Propagation. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 3, p. 291–296, 1999.

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

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. IAEA-TCS-17: **Guidebook on Non-destructive testing of Concrete Structures**. Viena: 2002.

ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. v.2. São Paulo: IBRACON, 2011.

JOISEL, A. **Fisuras y grietas en morteros y hormigones sus causas y remedios**. Barcelona [Espanha]: Tecnicos Asociados, 1975.

KRAAI, P. P. A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete. **Concrete Construction**, p. 775–778, 1985.

LANDIS, E.N.; SHAH, S.P. Frequency-dependent stress wave attenuation in cement-based materials. **Journal of Engineering Mechanics**, v.121, n. 6, p. 737–743, 1995.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto – Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**, v. 1. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 1982, 305p.

MA, Y.; ZHU, B.; TAN, M.; WU, K. Effect of Y type polypropylene fiber on plastic shrinkage cracking of cement mortar. **Materials and Structures**, v. 37, p. 92-95, 2004.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete**. 3rd edition. McGraw-Hill Professional, 2005. 659 p.

MENZEL, C. A. Causes and Prevention of Crack Development in Plastic Concrete. **Portland Cement Association**, Annual Meeting, p.130-136, 1954.

MIT, **Civil and Environmental Engineering Courses**. Disponível em: <<http://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/>>. Acesso em: 10/07/2013. 2000.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S., **The Ultrasonic Pulse Velocity Method**, CRC handbook on nondestructive testing of concrete, Tarun R. Naik and V M Malhotra eds, CRC Press, p. 169-189, 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. rev. atual São Paulo: PINI, 1997. 828p.

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

OWINO, J.O.; JACOBS, L.J. Attenuation measurements in cement-based materials using laser ultrasonics. **Journal of Engineering Mechanics**, v.125, n. 6, p. 637–647, 1999.

PELISSER, F.; SANTOS NETO, A. B. S.; ROVERE, H. L.; PINTO, R. C. A. Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2171–2176, 2010.

PHILIPPIDIS, T.P.; AGGELIS, D.G. Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. **Ultrasonics**, v. 43, p. 584–595, 2005.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. Capítulo 6: Bases para Cálculo. Notas de aula - Escola de Engenharia De São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

PROCEQ. Pundit Lab: instruções operacionais. 2013.

QUIVIGER, A; PAYAN, C; CHAIX, J.-F.; GARNIER, V; SALIN, J. Macro-crack characterization in concrete by diffuse ultrasound under low frequency dynamic loading, **Acoustical Society of America**, v. 16, 2012.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D. **Física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1984. v.2: Ondas

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

SERWAY, R. A. **Física**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1996. v.2: Movimento ondulatório e termodinâmica.

SHAH, S.P.; POPOVICS, J.S.; SUBRAMANIAN, K.V.; ALDEA, C.M. New directions in concrete health monitoring technology. **Journal of Engineering Mechanics**, v.126, n. 7, p. 754–760, 2000.

SHIOTANI, T; AGGELIS, D. G. **Determination of surface crack depth and repair effectiveness using Rayleigh waves**. In: Carpinteri A., Gambarova P., Ferro G, Plizzari G. eds. Fracture mechanics of concrete and concrete structures - design, assessment and retrofitting of RC structures. Taylor & Francis, London, p. 1011–1018, 2007.

SHIOTANI, T; AGGELIS, D. G. Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage. **Materials and Structures**, v. 42, p. 377-384, 2009.

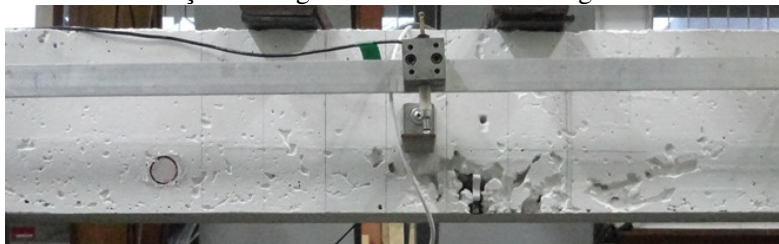
SOUZA, V. C. M; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

SUARIS, W.; FERNANDO, V. Ultrasonic Pulse Attenuation as a Measure of Damage Growth during Cyclic Loading of Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 84, n. 2, p. 185–193, 1987.

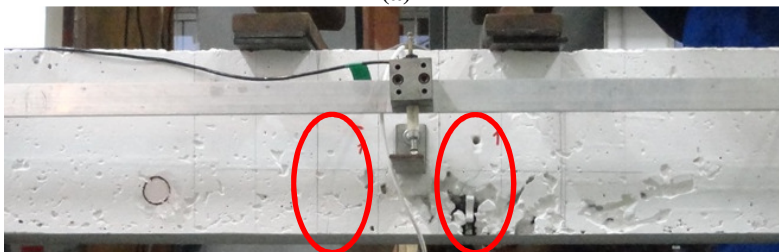
UNO, P. J. Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas, **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 4, p. 365-375, 1998.

APÊNDICE A - RESULTADOS DAS VIGAS

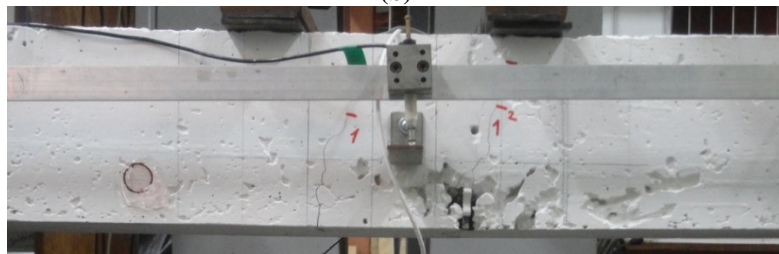
A fissuração das vigas 1 e 3 é exibida nas Figuras A.1 e A.2.



(a)



(b)



(c)



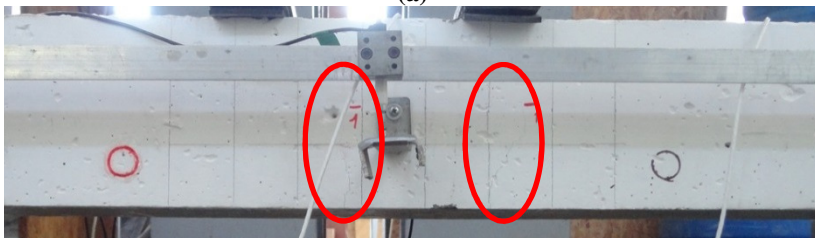
(d)

Figura A.1: Manifestação de fissuras ao longo do carregamento na viga 1 - a) Leitura 1 e 2; b) Leitura 3; c) Leitura 5; d) Leitura 7

A viga 1, como mostra a Figura A.1, apresentou vazios de concretagem na parte inferior central. No entanto, a análise feita com o ultrassom foi comparativa entre as diversas leituras, estando estes vazios presentes em todas as etapas do ensaio.



(a)



(b)



(c)



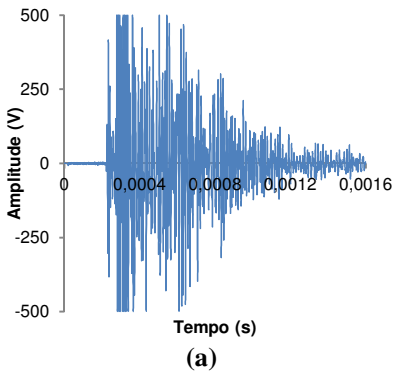
(d)



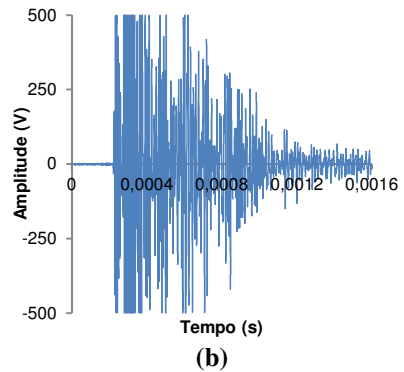
(e)

Figura A.2: Manifestação de fissuras ao longo do carregamento na viga 3 - a) Leitura 1 e 2; b) Leitura 3; c) Leitura 4; d) Leitura 5; e) Leitura 6

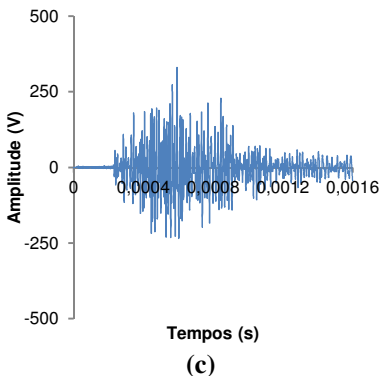
Os formatos de onda obtidos nas duas posições nas vigas 1 e 3 são exibidos nas Figuras A.3, A.4, A.5 e A.6. Na Figura A.7 são apresentados os formatos de onda obtidos nas leituras 6 e 7 da viga 2.



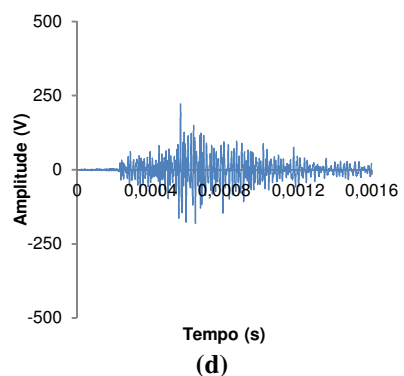
(a)



(b)



(c)



(d)

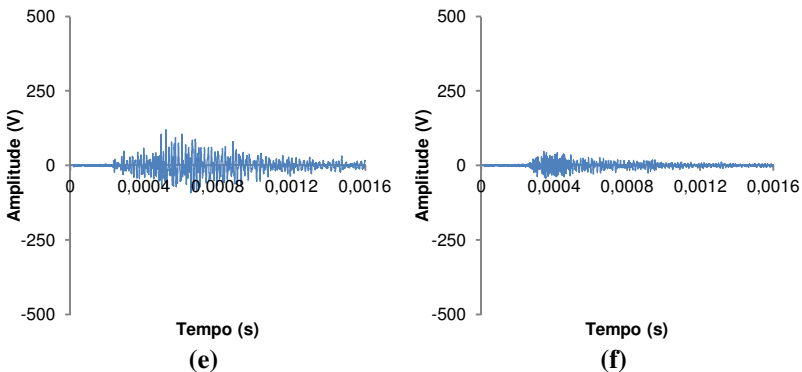
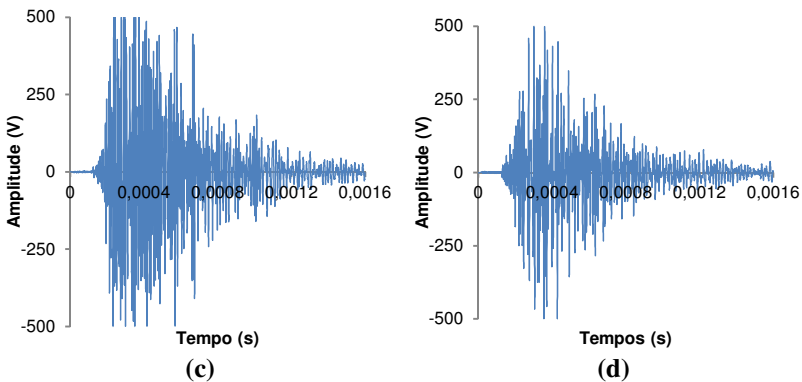
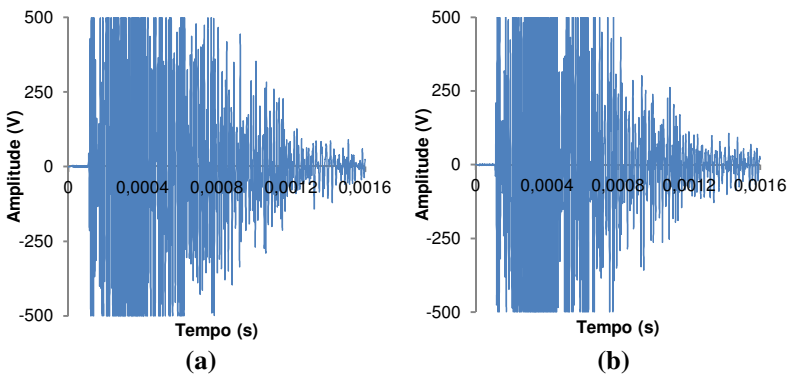


Figura A.3: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 1- Posição 1 - a) Leitura 1; b) Leitura 2; c) Leitura 3; d) Leitura 4; e) Leitura 5; f) Leitura 7



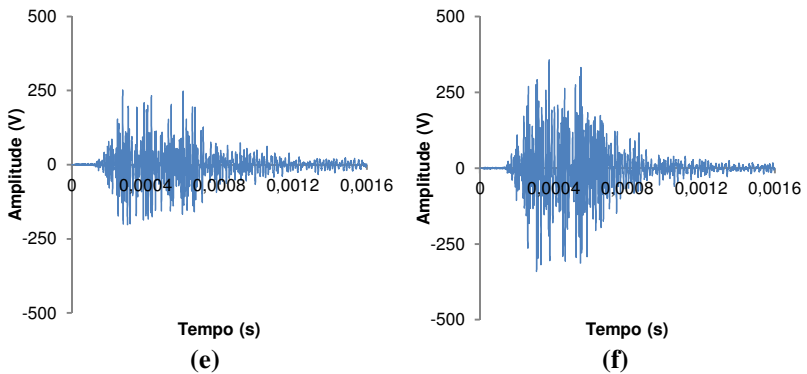
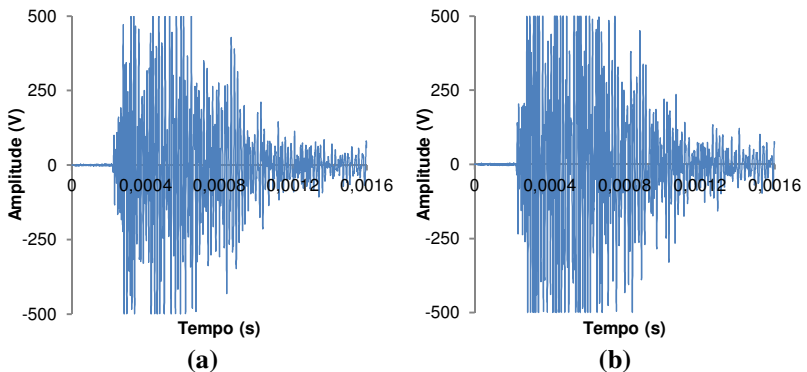


Figura A.4: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 1- Posição 2 - a) Leitura 1; b) Leitura 2; c) Leitura 3; d) Leitura 4; e) Leitura 5; f) Leitura 7

Na viga 1, a leitura 6 não foi realizada, pois foi a primeira a ser ensaiada. A partir da remoção da carga desta viga, após o rompimento, é que se atentou para a análise via ultrassom da mudança das fissuras na viga em colapso antes e após a retirada do carregamento.



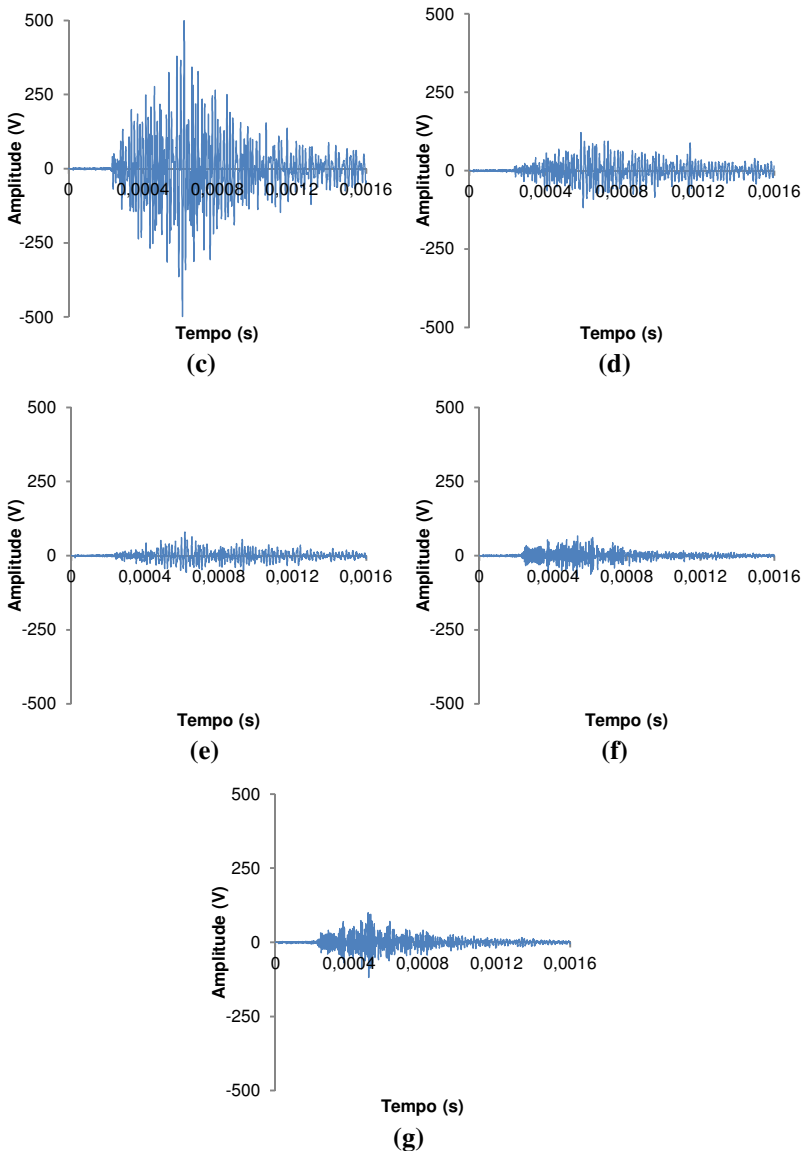
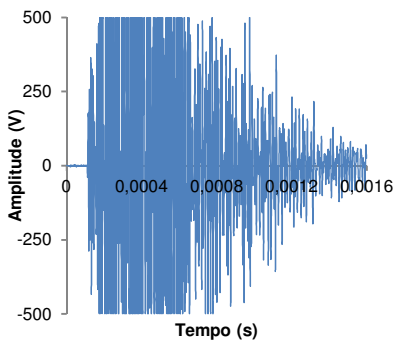
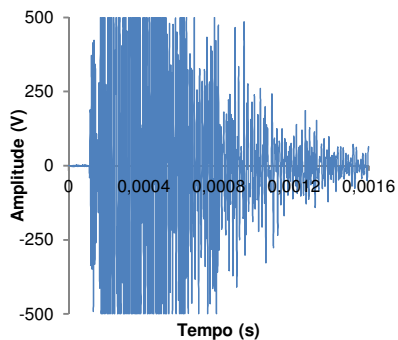


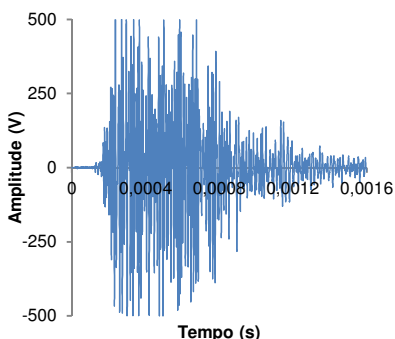
Figura A.5: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 3- Posição 1 - a) Leitura 1; b) Leitura 2; c) Leitura 3; d) Leitura 4; e) Leitura 5; f) Leitura 6; g) Leitura 7



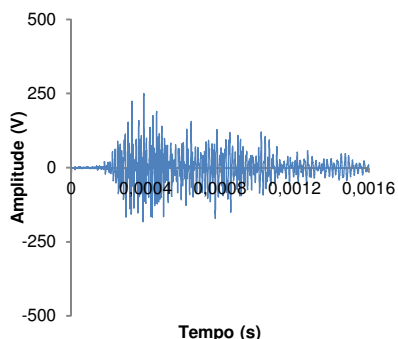
(a)



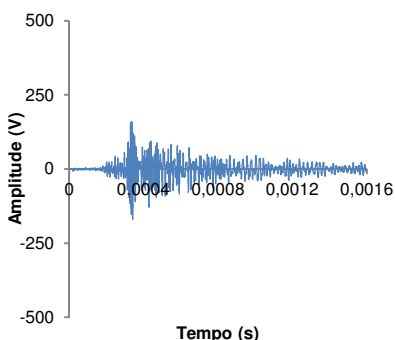
(b)



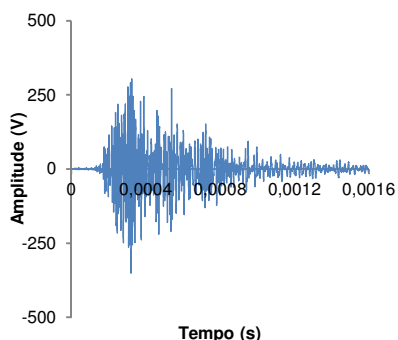
(c)



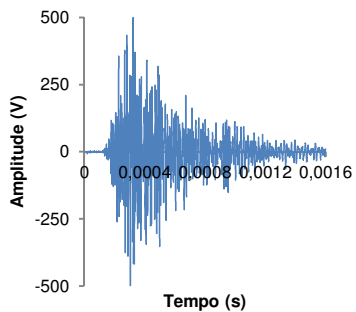
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura A.6: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 3- Posição 2 - a) Leitura 1; b) Leitura 2; c) Leitura 3; d) Leitura 4; e) Leitura 5; f) Leitura 6; g) Leitura 7

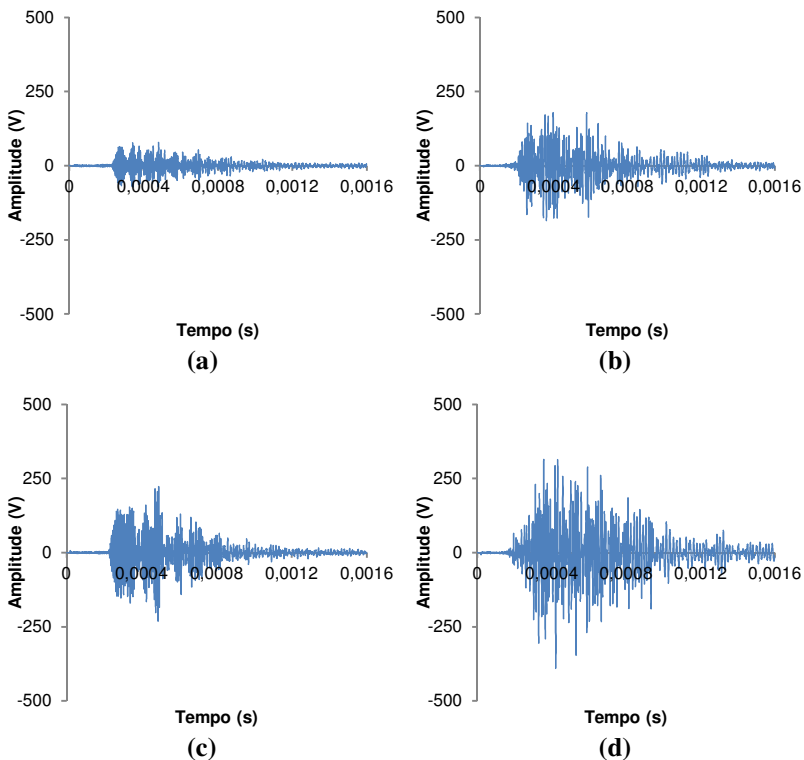


Figura A.7: Formato de onda obtida pelo ultrassom na Viga 2 - a) Leitura 6-Posição 1; b) Leitura 6-Posição 2; c) Leitura 7-Posição 1; d) Leitura 7-Posição 2

As ondas referentes à sexta leitura das vigas 2 e 3, após a ruptura do elemento, apresentam amplitudes maiores do que na leitura anterior (leitura 5). Esse comportamento contrário ao esperado ocorreu provavelmente devido à alteração do posicionamento da maior fissura depois da ruptura, fazendo com que o caminho percorrido pela onda também fosse ligeiramente modificado.

Enquanto isso, as ondas da última leitura apresentaram maiores amplitudes do que as da anterior (leitura 6), possivelmente por demonstrarem o comportamento de uma fissura após a retirada da carga atuante. Assim, a abertura da fissura diminuiu devido à redução da flexão da viga, fazendo com que a onda ganhe energia de propagação.

Os valores médios encontrados pelos parâmetros de frequência, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação para os intervalos “0 a 1600 μs ”, “0 a 500 μs ” e “ t_{pulso} a 1600 μs ” da viga 1 estão apresentados nas Tabelas A.1, A.2 e A.3.

Tabela A.1: Parâmetros de frequência na viga 1 - 0 a 1600 μs

	Pico de frequência máxima (kHz)		Magnitude da frequência máxima		Frequência central (kHz)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	141,2	151,8	32,5	88,2	111,6	118,5
Desvio padrão	1,6	0,6	4,9	5,6	1,4	1,1
Coeficiente de Variação (%)	1,1	0,4	15,2	6,4	1,3	0,9
Leitura 2	140,0	151,3	48,6	92,5	112,8	120,3
Desvio padrão	0,0	0,0	3,2	6,7	0,9	0,7
Coeficiente de Variação (%)	0,0	0,0	6,5	7,3	0,8	0,6
Leitura 3	94,3	153,5	15,6	40,0	100,0	117,3
Desvio padrão	37,0	0,7	0,3	4,2	0,9	2,4
Coeficiente de Variação (%)	39,3	0,5	1,8	10,5	0,9	2,0
Leitura 4	89,8	133,5	8,7	23,0	98,9	114,0
Desvio padrão	36,7	16,3	0,6	2,1	1,2	1,1
Coeficiente de Variação (%)	40,8	12,2	6,8	9,0	1,2	0,9
Leitura 5	54,9	139,7	8,0	14,3	97,2	117,1
Desvio padrão	0,2	12,3	0,6	2,5	0,6	1,3
Coeficiente de Variação (%)	0,4	8,8	7,1	17,4	0,6	1,1
Leitura 7	150,0	146,1	4,3	18,5	115,1	120,5
Desvio padrão	0,0	5,6	0,5	1,9	1,3	1,3
Coeficiente de Variação (%)	0,0	3,8	10,9	10,1	1,1	1,0

Tabela A.2: Parâmetros de frequência na viga 1 - 0 a 500 μ s

	Pico de frequência máxima (kHz)		Magnitude da frequência máxima		Frequência central (kHz)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	145,1	151,8	75,4	214,7	118,0	122,8
Desvio padrão	5,6	0,0	5,7	15,0	1,4	2,6
Coeficiente de Variação (%)	3,9	0,0	7,5	7,0	1,2	2,1
Leitura 2	139,9	151,8	119,0	213,2	120,0	128,4
Desvio padrão	0,0	0,0	10,4	10,0	0,5	0,5
Coeficiente de Variação (%)	0,0	0,0	8,7	4,7	0,0	0,0
Leitura 3	143,0	153,8	25,4	110,8	108,3	119,2
Desvio padrão	1,0	0,0	2,2	13,0	1,1	2,5
Coeficiente de Variação (%)	0,7	0,0	8,9	11,8	1,0	2,1
Leitura 4	65,9	133,2	10,3	56,2	105,4	117,3
Desvio padrão	0,0	16,2	1,1	2,2	2,4	1,1
Coeficiente de Variação (%)	0,0	12,2	10,5	4,0	2,3	0,9
Leitura 5	65,9	144,8	8,9	29,4	109,5	121,1
Desvio padrão	0,0	6,7	1,0	5,3	1,2	1,8
Coeficiente de Variação (%)	0,0	4,6	10,8	18,0	1,1	1,5
Leitura 7	150,4	163,6	9,8	36,3	129,0	121,6
Desvio padrão	0,9	5,0	1,0	5,7	0,7	1,3
Coeficiente de Variação (%)	0,6	3,1	10,5	15,8	0,6	1,1

Tabela A.3: Parâmetros de frequência na viga 1 - t_{pulso} a 1600 μs

	Pico de frequência máxima (kHz)		Magnitude da frequência máxima		Frequência central (kHz)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	146,2	151,9	37,0	94,4	112,2	118,4
Desvio padrão	6,2	0,4	5,3	4,6	1,4	1,1
Coeficiente de Variação (%)	4,2	0,3	14,5	4,9	1,3	0,9
Leitura 2	139,6	151,1	54,6	98,8	112,7	120,4
Desvio padrão	0,0	0,0	3,3	7,8	0,9	0,7
Coeficiente de Variação (%)	0,0	0,0	6,0	7,9	0,0	0,0
Leitura 3	94,3	154,1	18,5	43,9	99,1	116,2
Desvio padrão	37,0	0,0	0,8	4,8	0,9	1,8
Coeficiente de Variação (%)	39,2	0,0	4,3	10,8	1,0	1,5
Leitura 4	63,4	133,4	10,8	25,6	98,4	114,3
Desvio padrão	6,7	16,5	1,1	2,4	1,2	1,1
Coeficiente de Variação (%)	10,6	12,4	9,8	9,3	1,2	0,9
Leitura 5	54,9	144,0	9,9	15,9	98,3	116,9
Desvio padrão	0,0	10,7	0,7	2,9	2,7	1,4
Coeficiente de Variação (%)	0,0	7,5	7,2	18,0	2,8	1,2
Leitura 7	149,8	146,1	4,8	20,5	114,3	119,7
Desvio padrão	0,2	5,5	0,7	2,2	2,7	0,8
Coeficiente de Variação (%)	0,1	3,8	14,6	10,5	2,3	0,7

Os valores médios encontrados pelos parâmetros de frequência, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação para os intervalos “0 a 1600 μs ”, “0 a 500 μs ” e “ t_{pulso} a 1600 μs ” da viga 2 estão apresentados nas Tabelas A.4, A.5 e A.6.

Tabela A.4: Parâmetros de frequência na viga 2 - 0 a 1600 μ s

	Pico de frequência máxima (kHz)		Magnitude da frequência máxima		Frequência central (kHz)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	142,5	152,3	42,9	80,2	105,4	117,7
Desvio padrão	1,7	2,2	9,9	7,0	5,5	0,4
Coefficiente de Variação (%)	1,2	1,5	23,1	8,7	5,2	0,4
Leitura 2	142,5	157,4	62,6	81,1	104,0	117,2
Desvio padrão	0,0	4,3	5,5	6,4	1,8	1,1
Coefficiente de Variação (%)	0,0	2,8	8,8	7,8	1,7	0,9
Leitura 3	90,9	147,4	40,0	59,9	98,9	117,4
Desvio padrão	44,4	6,6	1,6	4,1	1,1	1,1
Coefficiente de Variação (%)	48,8	4,5	4,1	6,8	1,1	0,9
Leitura 4	53,1	69,9	17,2	20,0	91,1	109,3
Desvio padrão	0,0	18,1	1,7	1,5	1,0	1,3
Coefficiente de Variação (%)	0,0	25,9	9,7	7,4	1,1	1,2
Leitura 5	57,7	63,2	4,6	3,3	97,8	102,4
Desvio padrão	6,0	7,5	1,1	0,4	1,7	2,8
Coefficiente de Variação (%)	10,5	11,8	24,1	12,3	1,7	2,8
Leitura 6	144,2	146,5	6,5	11,3	125,5	115,8
Desvio padrão	1,3	2,8	0,5	1,3	0,9	1,4
Coefficiente de Variação (%)	0,9	1,9	8,1	11,4	0,8	1,2
Leitura 7	145,9	82,4	15,6	18,8	129,1	112,4
Desvio padrão	0,3	39,5	1,4	1,7	0,9	2,0
Coefficiente de Variação (%)	0,2	48,0	8,8	9,2	0,7	1,8

Tabela A.5: Parâmetros de frequência na viga 2 - 0 a 500 μ s

	Pico de frequência máxima (kHz)		Magnitude da frequência máxima		Frequência central (kHz)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	142,4	151,8	91,8	208,1	112,6	122,8
Desvio padrão	1,2	0,0	23,4	10,9	5,0	1,5
Coefficiente de Variação (%)	0,8	0,0	25,5	5,2	4,4	1,2
Leitura 2	142,4	158,4	152,6	181,0	113,5	121,5
Desvio padrão	0,9	3,3	19,8	28,4	1,6	1,2
Coefficiente de Variação (%)	0,6	2,1	12,9	15,7	0,0	0,0
Leitura 3	119,5	145,0	58,4	133,8	108,5	122,5
Desvio padrão	36,6	7,9	3,9	12,1	1,4	1,7
Coefficiente de Variação (%)	30,6	5,5	6,7	9,1	1,3	1,4
Leitura 4	106,8	96,6	16,6	47,3	110,2	110,1
Desvio padrão	1,0	20,0	0,8	1,5	0,9	1,5
Coefficiente de Variação (%)	0,9	20,7	5,0	3,2	0,8	1,3
Leitura 5	139,9	153,1	6,0	5,1	111,7	111,8
Desvio padrão	0,0	1,0	1,3	0,5	2,5	1,9
Coefficiente de Variação (%)	0,0	0,6	21,9	9,8	2,3	1,7
Leitura 6	142,4	151,5	12,8	25,5	134,9	118,7
Desvio padrão	0,9	2,7	1,3	3,2	0,6	1,3
Coefficiente de Variação (%)	0,6	1,8	10,1	12,6	0,4	1,1
Leitura 7	143,3	123,7	39,2	36,4	136,0	113,6
Desvio padrão	2,2	34,7	4,0	5,2	1,5	1,9
Coefficiente de Variação (%)	1,5	28,0	10,1	14,4	1,1	1,7

Tabela A.6: Parâmetros de frequência na viga 2 - t_{pulso} a 1600 μs

	Pico de frequência máxima (kHz)		Magnitude da frequência máxima		Frequência central (kHz)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	142,5	151,7	48,5	82,6	105,4	117,7
Desvio padrão	1,8	0,0	11,4	7,0	5,5	0,5
Coefficiente de Variação (%)	1,3	0,0	23,5	8,4	5,2	0,4
Leitura 2	142,0	154,6	76,1	84,1	102,1	117,3
Desvio padrão	0,0	5,7	6,5	3,3	1,2	1,2
Coefficiente de Variação (%)	0,0	0,0	8,5	3,9	0,0	0,0
Leitura 3	83,2	148,5	48,0	64,9	99,1	117,3
Desvio padrão	42,6	7,7	3,3	4,4	1,1	1,1
Coefficiente de Variação (%)	51,2	5,2	7,0	6,8	1,1	0,9
Leitura 4	53,0	70,1	22,7	22,1	98,2	109,9
Desvio padrão	0,0	17,8	2,4	2,0	0,4	1,3
Coefficiente de Variação (%)	0,0	25,4	10,3	9,2	0,4	1,1
Leitura 5	57,2	64,9	6,5	4,0	110,3	111,7
Desvio padrão	5,8	5,9	1,8	0,3	2,9	1,3
Coefficiente de Variação (%)	10,1	9,0	27,2	6,9	2,6	1,2
Leitura 6	143,5	148,8	7,5	12,8	124,4	115,9
Desvio padrão	0,5	5,2	0,6	1,4	0,4	1,0
Coefficiente de Variação (%)	0,3	3,5	8,4	11,1	0,3	0,9
Leitura 7	145,9	82,1	18,6	22,2	128,8	115,0
Desvio padrão	0,2	39,9	1,6	0,8	0,9	1,7
Coefficiente de Variação (%)	0,1	48,6	8,4	3,4	0,7	1,5

Os valores médios encontrados pelos parâmetros de frequência, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação para os intervalos “0 a 1600 μs ”, “0 a 500 μs ” e “ t_{pulso} a 1600 μs ” da viga 3 estão apresentados nas Tabelas A.7, A.8 e A.9.

Tabela A.7: Parâmetros de frequência na viga 3 - 0 a 1600 μ s

	Pico de frequência máxima (kHz)		Magnitude da frequência máxima		Frequência central (kHz)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	103,9	143,1	31,2	63,6	99,7	113,3
Desvio padrão	40,6	9,2	11,0	5,9	3,1	1,2
Coefficiente de Variação (%)	39,0	6,5	35,4	9,3	3,1	1,1
Leitura 2	124,0	148,2	48,7	68,5	103,1	115,7
Desvio padrão	31,5	3,3	2,8	3,7	1,5	1,5
Coefficiente de Variação (%)	25,4	2,3	5,8	5,4	1,4	1,3
Leitura 3	64,4	144,1	28,6	39,7	93,5	111,5
Desvio padrão	0,0	5,7	2,4	2,5	1,4	1,0
Coefficiente de Variação (%)	0,0	4,0	8,4	6,2	1,5	0,9
Leitura 4	63,4	143,3	7,5	15,6	94,2	101,9
Desvio padrão	4,5	0,6	0,9	1,4	1,4	0,1
Coefficiente de Variação (%)	7,1	0,4	12,2	8,9	1,5	0,1
Leitura 5	62,0	147,5	5,9	8,6	93,1	106,4
Desvio padrão	2,4	0,0	0,6	0,6	1,1	1,2
Coefficiente de Variação (%)	3,9	0,0	9,9	6,5	1,2	1,1
Leitura 6	147,1	148,3	4,0	22,5	122,3	118,6
Desvio padrão	7,1	0,3	0,4	4,2	3,4	2,5
Coefficiente de Variação (%)	4,8	0,2	9,8	18,6	2,8	2,1
Leitura 7	152,7	146,1	5,8	26,3	123,4	116,1
Desvio padrão	1,9	2,7	0,5	2,9	1,1	2,2
Coefficiente de Variação (%)	1,2	1,9	8,3	11,0	0,9	1,9

Tabela A.8: Parâmetros de frequência na viga 3 - 0 a 500 μ s

	Pico de frequência máxima (kHz)		Magnitude da frequência máxima		Frequência central (kHz)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	143,9	131,0	57,9	127,7	105,1	111,4
Desvio padrão	0,0	11,0	22,4	12,3	3,5	1,8
Coeficiente de Variação (%)	0,0	8,4	38,7	9,7	3,3	1,6
Leitura 2	84,7	140,0	95,5	137,5	107,6	114,7
Desvio padrão	32,6	9,5	8,0	11,4	2,7	1,5
Coeficiente de Variação (%)	38,5	6,8	8,3	8,3	0,0	0,0
Leitura 3	65,9	96,6	44,0	76,4	105,0	112,6
Desvio padrão	0,0	40,5	3,0	5,5	1,5	1,1
Coeficiente de Variação (%)	0,0	41,9	6,9	7,2	1,5	1,0
Leitura 4	135,4	143,9	7,9	32,7	111,2	106,3
Desvio padrão	29,3	0,0	1,8	3,8	2,4	1,2
Coeficiente de Variação (%)	21,7	0,0	22,3	11,6	2,1	1,1
Leitura 5	63,9	135,7	4,0	15,3	101,7	117,2
Desvio padrão	0,0	8,9	0,3	0,3	2,0	1,2
Coeficiente de Variação (%)	0,0	6,5	6,9	2,3	1,9	1,0
Leitura 6	149,5	147,9	7,6	56,1	131,6	123,0
Desvio padrão	8,9	0,0	0,7	6,7	1,8	2,3
Coeficiente de Variação (%)	5,9	0,0	9,1	11,9	1,4	1,9
Leitura 7	158,0	146,9	10,0	61,1	135,2	119,2
Desvio padrão	3,7	3,0	0,8	11,9	1,0	2,4
Coeficiente de Variação (%)	2,3	2,0	7,5	19,4	0,7	2,0

Tabela A.9: Parâmetros de frequência na viga 3 - t_{pulso} a 1600 μs

	Pico de frequência máxima (kHz)		Magnitude da frequência máxima		Frequência central (kHz)	
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 1	Pos. 2
Leitura 1	117,3	148,1	36,7	67,6	99,5	112,3
Desvio padrão	38,3	5,9	13,2	8,1	1,9	1,1
Coefficiente de Variação (%)	32,6	4,0	36,0	12,0	2,0	1,0
Leitura 2	110,3	148,0	55,2	72,8	103,0	115,7
Desvio padrão	38,0	3,8	3,5	5,5	1,5	1,5
Coefficiente de Variação (%)	0,0	0,0	6,3	7,6	0,0	0,0
Leitura 3	64,4	145,3	34,0	43,8	99,4	112,7
Desvio padrão	0,0	6,0	2,1	3,6	5,5	1,6
Coefficiente de Variação (%)	0,0	4,1	6,2	8,2	5,6	1,4
Leitura 4	64,5	144,1	9,5	18,1	97,9	111,0
Desvio padrão	4,6	0,0	0,7	1,5	1,1	0,9
Coefficiente de Variação (%)	7,2	0,0	7,5	8,2	1,1	0,8
Leitura 5	61,0	147,6	6,9	9,0	102,9	114,9
Desvio padrão	2,9	0,0	1,0	0,5	1,2	1,5
Coefficiente de Variação (%)	4,7	0,0	14,9	5,9	1,1	1,3
Leitura 6	139,7	148,5	4,4	25,0	118,3	118,5
Desvio padrão	0,0	0,3	0,7	4,7	2,3	2,5
Coefficiente de Variação (%)	0,0	0,2	15,2	18,9	1,9	2,1
Leitura 7	153,8	146,2	6,5	29,3	121,8	116,1
Desvio padrão	1,4	2,7	0,6	3,5	1,2	2,2
Coefficiente de Variação (%)	0,9	1,9	9,1	11,9	1,0	1,9

Os gráficos para comparação dos resultados dos parâmetros de pico de frequência máxima e frequência central nos intervalos de tempo “0 a 1600 μs ”, “0 a 500 μs ” e “ t_{pulso} a 1600 μs ” são exibidos nas Figuras A.8, A.9 e A.10, respectivamente.

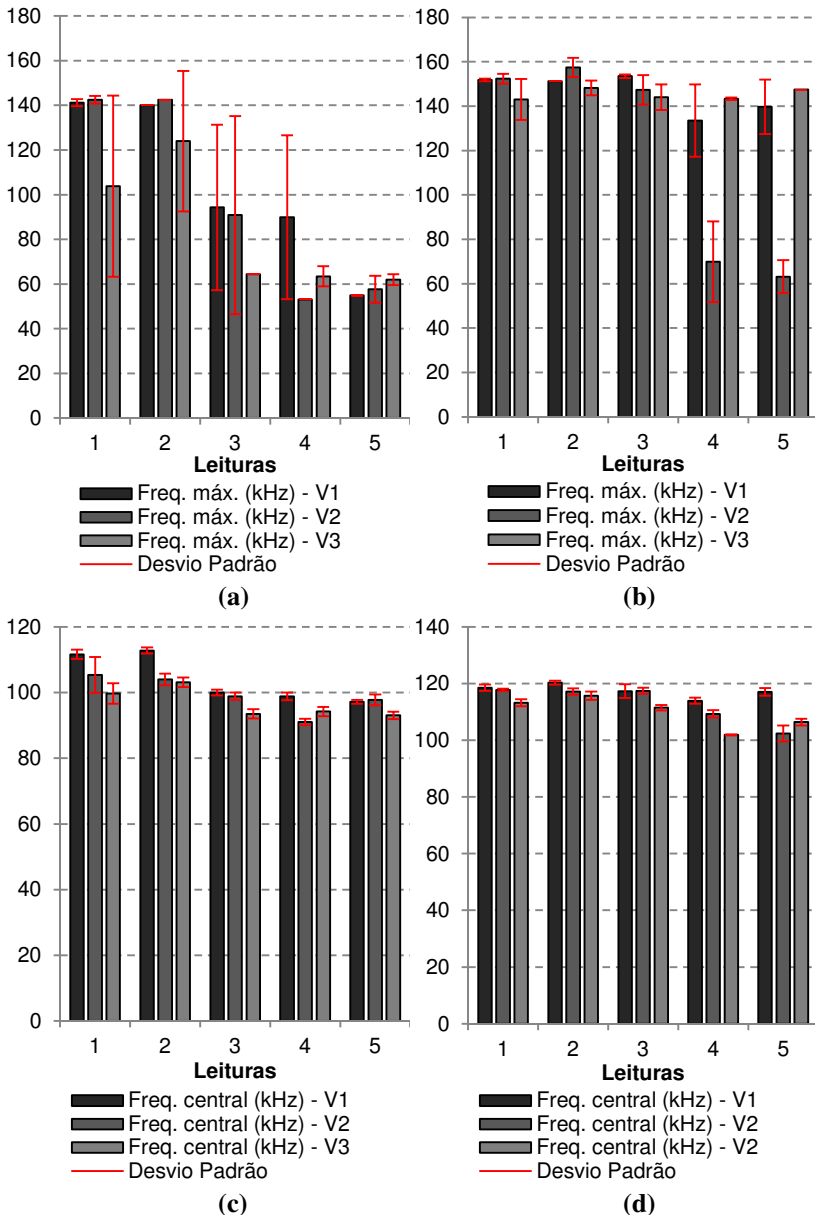


Figura A.8: Parâmetros de frequência nas três vigas - 0 a 1600 μ s - a) Pico de freq. máx. posição 1; b) Pico de freq. máx. posição 2; c) Freq. central. posição 1; d) Freq. central posição 2

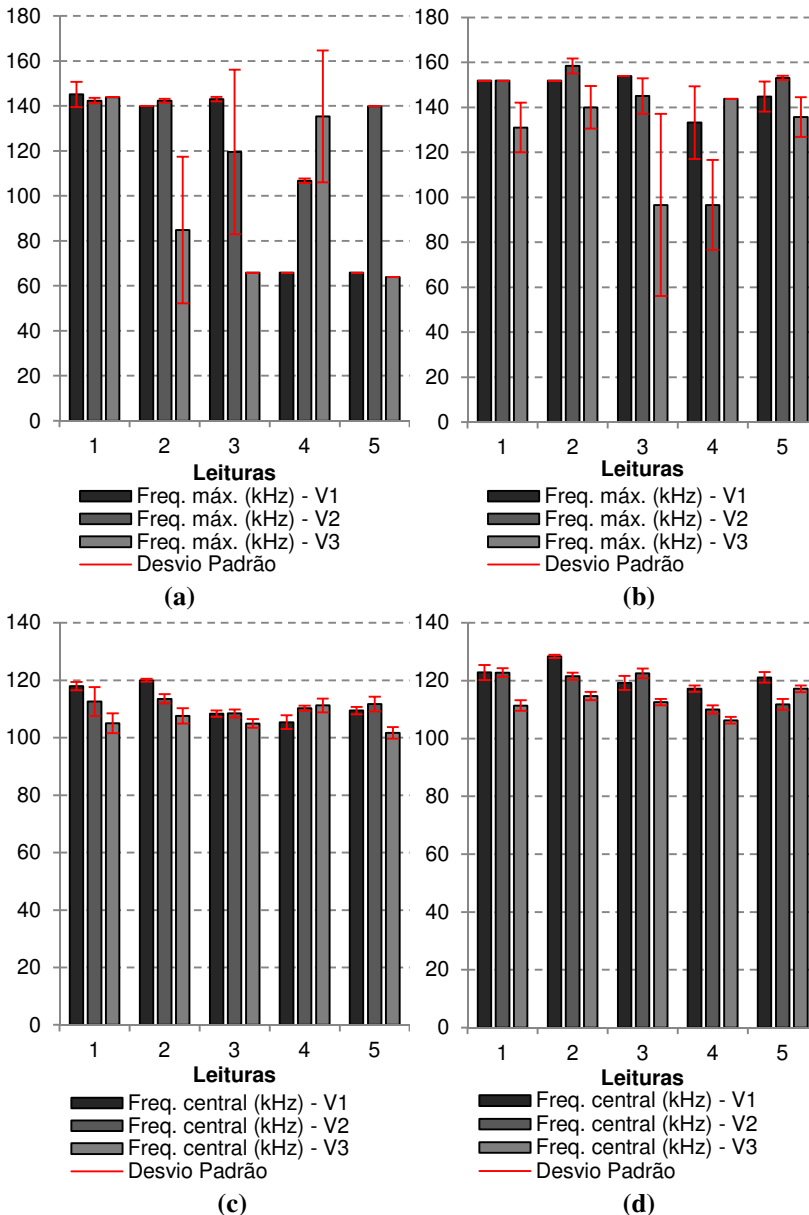


Figura A.9: Parâmetros de frequência nas três vigas - 0 a 500 μ s - a) Pico de freq. máx. posição 1; b) Pico de freq. máx. posição 2; c) Freq. central. posição 1; d) Freq. central posição 2

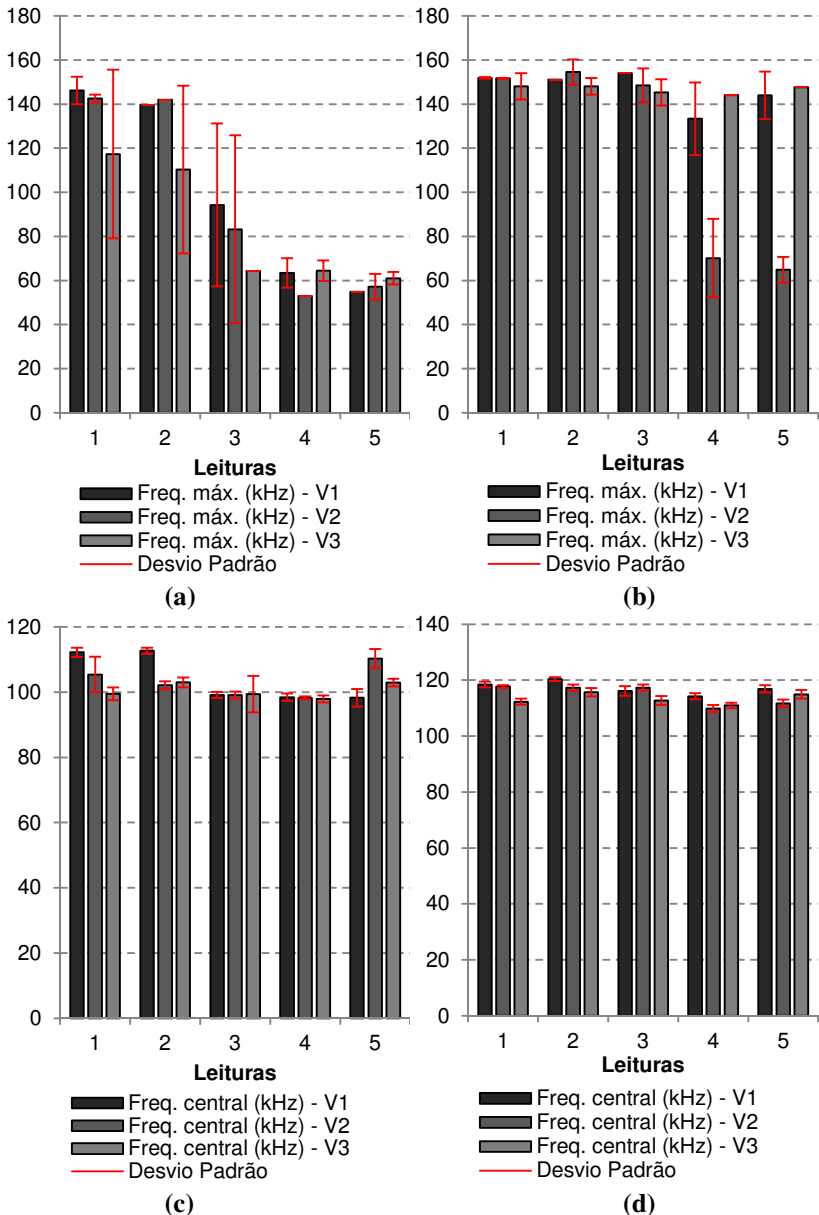


Figura A.10: Parâmetros de frequência nas três vigas - t_{pulso} a 1600 μs - a) Pico de freq. máx. posição 1; b) Pico de freq. máx. posição 2; c) Freq. central. posição 1; d) Freq. central posição 2