



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Isaque Vargas Tinoco

**Avaliação da perda de rigidez de vigas de concreto armado utilizando o método de
difusão da energia de ondas ultrassônicas**

Florianópolis, SC
2019

Isaque Vargas Tinoco

Avaliação da perda de rigidez de vigas de concreto armado utilizando o método de difusão da energia de ondas ultrassônicas

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

Orientador: Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD.

Florianópolis, SC

2019

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

Tinoco, Isaque Vargas

Avaliação da perda de rigidez de vigas de concreto armado utilizando o método de difusão da energia de ondas ultrassônicas / Isaque Vargas Tinoco ; orientador, Roberto Caldas de Andrade Pinto, 2019.

177 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Ensaio de ultrassom. 3. Método da difusão ultrassônica. 4. Fissuração. 5. Perda de rigidez. I. Pinto, Roberto Caldas de Andrade. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Isaque Vargas Tinoco

Avaliação da perda de rigidez de vigas de concreto armado utilizando o método de difusão da energia de ondas ultrassônicas

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Leandro Mouta Trautwein, Dr.
Universidade Estadual de Campinas

Prof^ª. Poliana Dias de Moraes, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Prof. Dra. Poliana Dias de Moraes
Coordenadora do Programa

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD
Orientador

Florianópolis, 26 de setembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar meu caminho e por todo cuidado e capacitação ao longo da minha formação acadêmica. A Ele toda honra e toda glória!

Aos meus pais, Ademir e Clésia, por todo incentivo e por todo apoio, desde os primeiros passos. Pelo amor incondicional que me faz seguir em frente, na certeza de que, mesmo de longe, seus corações e suas orações estão comigo. Vocês são meu alicerce.

À minha irmã, Rebeca, pelo carinho e companheirismo.

Aos meus avós maternos, Alice e Joel, por todo conhecimento e experiências compartilhadas, pelo exemplo de vida, de trabalho, de comprometimento e de honestidade. Aos avós paternos, Vina (*in memoriam*) e Cely, que sempre estiveram ao meu lado e torceram por mim, se alegrando com cada vitória conquistada. Especialmente à vó Vina, que sempre sonhou os meus sonhos, me amparou e que estaria cheia de orgulho com mais essa etapa concluída.

À toda minha família, tias, tios, primas e primos, pela torcida, pelo suporte (muitas vezes financeiro) e pelas orações.

Ao meu orientador, Professor Roberto Caldas de Andrade Pinto, por sua orientação ao longo desses dois anos, pelas grandes contribuições e pelo auxílio no desenvolvimento da pesquisa, sempre com paciência e dedicação.

Aos professores Leandro Fleck Fadel Miguel e Poliana Dias de Moraes, pelas valiosas contribuições dadas no exame de qualificação da dissertação e, juntamente com o professor Leandro Mouta Trautwein, por terem aceitado fazer parte da banca examinadora da minha dissertação de mestrado.

Aos professores e colegas do GPEND. Às amigas de mestrado, Hella Fernanda Giehl Bressan e Brunela Francine da Cunha, por compartilharem as dificuldades e os desafios durante a fase experimental, principalmente, na etapa das concretagens. Ao amigo Pedro Paulo Mingote Martins, pelas horas e mais horas de conversas sobre esse “mundo difuso” que tanto nos tirou o sono. Ao graduando Paulo Augusto da Rocha (Guto), pela ajuda, muitas vezes incondicional, e pelas ideias criativas na solução de problemas inesperados.

Aos velhos amigos e às amigadas construídas durante o tempo de mestrado, com quem dividi a vida em Floripa e que tornaram a caminhada mais leve. Aos amigos de república, do PPGEC e da IPT, em especial: Lucas Farias, Lúcia Mingote, Emmanuelle Garcia, Igor Pereira e Daniel Tinoco.

Aos servidores e aos funcionários da UFSC, que, direta ou indiretamente, ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, especialmente, ao professor Lourenço Panosso Perlin (LEE/GPEND), aos técnicos administrativos Luis Henrique dos Santos e Renato Santana da Lapa (LMCC) e à Priscila Ferreira (Secretaria).

Às empresas Supremo Secil Cimentos, em nome do Engenheiro Civil Edio Schmitt, e Engemix - Votorantim Cimentos, em nome do Engenheiro Civil Fabrício Azevedo, pelo apoio através da doação dos materiais utilizados nas concretagens.

Ao Grupo LabTrans, pelo financiamento com a bolsa de pesquisa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para essa pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A ocorrência do processo de fissuração em elementos de concreto armado submetidos à flexão é bastante comum, levando à perda de propriedades mecânicas e de rigidez da estrutura, uma vez que esse processo ocasiona a diminuição da seção transversal e altera sua rigidez efetiva, fato que pode, inclusive, provocar a ruptura em situações extremas. Nesse contexto, o método da difusão ultrassônica, associado ao ensaio de ultrassom, tem sido utilizado para avaliar e caracterizar tais elementos de concreto armado quanto à presença e à profundidade de fissuras. Esse método descreve a evolução temporal da densidade média de energia de um campo de onda ultrassônica utilizando a equação da difusão e está relacionado ao comportamento disperso e aleatório de ondas ultrassônicas ao se propagarem em um meio heterogêneo (e.g. concreto), sendo sensível a pequenas mudanças na microestrutura do material. Isto posto, essa pesquisa avaliou a perda de rigidez de vigas de concreto armado submetidas ao ensaio de flexão por meio da aplicação do método da difusão ultrassônica em leituras do ensaio de ultrassom realizadas nas vigas ao longo do ensaio de flexão. Para tal, foram moldadas nove vigas de concreto armado de seção 15 x 22 cm e comprimento de 170 cm, subdivididas em três lotes de três vigas cada, alterando apenas a taxa de armadura longitudinal de flexão entre os lotes. As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos, instrumentadas com LVDTs, para medir o deslocamento linear no meio do vão; com extensômetros, para quantificar as deformações do aço e do concreto na seção central; e com transdutores de ultrassom, distantes 30 cm entre si, eixo a eixo, centrados no meio vão. As leituras do ensaio de ultrassom, realizadas pelo aparelho de ultrassom *Pundit Lab*, foram feitas em intervalos de 20s por transdutores de frequência de 200 kHz, obtendo formatos de ondas distintos para cada etapa de carregamento. Os parâmetros de difusão (difusividade, dissipação, P_0 e ATME) foram recuperados por meio de uma análise tempo-frequência feita para cada leitura de ultrassom. As rigidezes efetivas das vigas foram determinadas a partir dos dados de deformação e de deslocamento em cada instante. Em seguida, foram analisados os comportamentos dos parâmetros de difusão com o aumento dos danos progressivos causados pelo processo de fissuração, correlacionando-os com a perda de rigidez da estrutura. Como resultado, observou-se que a difusividade e o ATME foram os parâmetros mais sensíveis ao início da fissuração e apresentaram comportamento associado à variação de rigidez das vigas. Ao serem correlacionados com a rigidez, a difusividade e o ATME apresentaram coeficientes de correlação médios com a perda de rigidez de 0,88 e -0,91, respectivamente, permitindo concluir ser possível estimar a perda de rigidez por meio desses parâmetros.

Palavras-chave: Ensaio de ultrassom. Método da difusão ultrassônica. Perda de rigidez. Fissuração. Vigas de concreto armado.

ABSTRACT

The occurrence of the cracking process in reinforced concrete elements under bending is very common, leading to the loss of mechanical and stiffness properties of the structure. This process decreases the cross-section area and alters its effective stiffness, which may even cause rupture in extreme situations. In this context, the diffuse ultrasound method, associated with the ultrasound test, has been used to evaluate and characterize such reinforced concrete elements regard to cracking's presence and depth. This method describes the temporal evolution of the average energy density of an ultrasonic wave field using the diffusion equation and is related to the scattered and random behavior of waves propagating in a heterogeneous medium (like concrete), being sensitive to small changes in the material infrastructure. Thus, this research evaluated the loss of stiffness of reinforced concrete beams submitted to the bending test by means of the application of the diffuse ultrasound method on readings of the ultrasound test performed on the beams simultaneously to the bending test. To this end, nine reinforced concrete beams with a cross section of 15 x 22 cm² and length of 170 cm were casted, subdivided into three batches of three beams each, altering only the longitudinal flexural reinforcement rate between batches. The beams were submitted to a four-point bending test, instrumented with LVDTs, to measure the mid-span linear displacement; with strain gauges, to quantify steel and concrete deformations in the central section; and with ultrasound transducers, positioned 30 cm apart, centered in the middle span. Ultrasound readings from the *Pundit Lab* ultrasound tester were taken at 20-second intervals by 200 kHz frequency transducers, obtaining distinct waveforms for each loading step. The diffusion parameters (diffusivity, dissipation, P_0 and ATME) were recovered using a time-frequency analysis performed for each ultrasound reading. The stiffness of the beams was calculated from the deformation and displacement data at each moment. After that, the behavior of the diffusion parameters with increasing progressive damage caused by the cracking process was analyzed and correlated with the loss of stiffness of the structures. As a result, it was observed that diffusivity and ATME were the most sensitive parameters to crack beginning and presented behaviors associated with the beams stiffness variation. When correlated with stiffness loss, diffusivity and ATME presented mean correlation coefficients of 0.88 and -0.91, respectively, allowing to conclude that it is possible to estimate the loss of stiffness through the diffusion parameters.

Keywords: Ultrasound test. Diffuse ultrasound method. Stiffness loss. Cracking. Reinforced concrete beams.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – (a) Onda longitudinal; (b) onda transversal. | 30 |
| Figura 2 – Geração e propagação de ondas ultrassônicas próximo aos cristais piezelétricos (identificados pelos pontos em vermelho)..... | 32 |
| Figura 3 – Descrição esquemática de um feixe ultrassônico gerado por um transdutor plano de diâmetro D | 33 |
| Figura 4 – Propagação em um meio (a) sem elementos dispersores, (b) com dispersores distribuídos e (c) com posicionamento diferente dos dispersores. | 34 |
| Figura 5 – Sinal de frequência central de 200 kHz transmitido no concreto..... | 36 |
| Figura 6 – (a) Princípio da reflexão; (b) refração de uma onda ultrassônica na superfície entre meios. | 38 |
| Figura 7 – (a) Sistema de medição sendo calibrado utilizando um corpo-de-prova de teste; (b) exemplo de sinal mostrando o ponto de chegada da onda de compressão (marcada em vermelho)..... | 40 |
| Figura 8 – Configuração de transmissão (a) direta, (b) semidireta e (c) indireta. | 40 |
| Figura 9 – Influência da difusividade na densidade de energia, considerando a solução 3D infinita. | 45 |
| Figura 10 – Influência da dissipação na densidade de energia, considerando a solução 3D infinita. | 46 |
| Figura 11 – (a) Sinal de uma onda ultrassônica difusa no domínio do tempo; (b) representação da densidade espectral de energia em função do tempo (linha pontilhada) e aproximação por uma solução analítica (linha contínua)..... | 49 |
| Figura 12 – Resultado experimental e ajuste à solução analítica para frequência de excitação de (a) 100 kHz, (b) 300 kHz e (c) 500 kHz..... | 51 |
| Figura 13 – Parâmetros de difusão em função da frequência: (a) difusividade e (b) dissipação. | 53 |
| Figura 14 – Comparação da dissipação (a) calculada a partir de amostras com agregados (de 1 e 3 mm), sem agregados e de aço, e (b) obtidas a partir da regressão linear para amostras sem agregados e com agregados (de 1 e 3 mm)..... | 54 |
| Figura 15 – Comparação da difusividade média entre amostrar (a) com agregados de 1 e 3 mm e (b) com agregados de 3 mm e sem agregados..... | 55 |
| Figura 16 – Sinal de ultrassom difuso típico (a) de uma amostra não fissurada e (b) de uma amostra com fissura de 10,16 cm. | 55 |

| | |
|---|----|
| Figura 17 – Defasagem entre ATMEs <i>versus</i> profundidade da fissura, para uma distância entre transdutores de 6 cm..... | 56 |
| Figura 18 – Variação da (a) difusividade e (b) dissipação em corpos de prova fissurados, em função da frequência. | 57 |
| Figura 19 – Variação dos parâmetros de difusão em amostras fissuradas (azul) e com fendas (vermelho), em função da profundidade da fissura. (a) Difusividade, (b) dissipação e (c) ATME. | 57 |
| Figura 20 – Comparação entre o ATME e a profundidade de fissura, considerando a presença (linha contínua) ou não (linha pontilhada) de armadura, para diferentes distâncias entre transdutores, representadas pela variável “2d”..... | 58 |
| Figura 21 – Difusividade e dissipação recuperados de corpos de prova danificados pela, obtidos a partir do modelo infinito 3D. | 59 |
| Figura 22 – Densidade espectral de energia com curvas de ajuste correspondentes aos modelos infinito e finito. | 60 |
| Figura 23 – Comparação da difusividade com a profundidade das fissuras. | 61 |
| Figura 24 – (a) Sequência da aplicação de carga; (b), (c) e (d) valores da difusividade medida em diferentes posições..... | 62 |
| Figura 25 – Idealização estrutural do Ensaio de Stuttgart, diagrama de momento fletor (DMF) e diagrama de esforço cortante (DEC). | 67 |
| Figura 26 – Comportamento da seção transversal de uma viga de concreto armado na flexão normal simples. | 67 |
| Figura 27 – Diagrama momento-curvatura de um elemento submetido à flexão. | 70 |
| Figura 28 – Exemplo de distribuição das fissuras em uma viga. | 71 |
| Figura 29 – Fluxograma do programa experimental. | 74 |
| Figura 30 – Aparelho de ultrassom Pundit Lab..... | 76 |
| Figura 31 – Detalhamento do cone: (a) perspectiva, (b) vista superior e (c) vista lateral, com dimensões em mm. | 77 |
| Figura 32 – Detalhamento padrão das vigas (dimensões em centímetros)..... | 79 |
| Figura 33 – Formas e posicionamento das armaduras..... | 80 |
| Figura 34 – Posicionamento dos extensômetros..... | 81 |
| Figura 35 – Posicionamento dos transdutores na face inferior da viga. | 81 |
| Figura 36 – Configuração de carregamento. | 82 |
| Figura 37 – Receptor pontual. | 85 |
| Figura 38 – Fixação dos transdutores..... | 85 |

| | |
|--|-----|
| Figura 39 – Espectrogramas das análises de sinal com Δt igual a (a) 8 μs , (b) 16 μs , (c) 32 μs , (d) 64 μs e (e) 128 μs | 91 |
| Figura 40 – Pulsos ultrassônicos obtidos em diferentes distâncias entre transdutores, sem a utilização do cone..... | 95 |
| Figura 41 – Pulsos ultrassônicos obtidos em diferentes distâncias entre transdutores, com a utilização do cone..... | 96 |
| Figura 42 – Comportamento da difusividade em função da distância entre transdutores, sendo CC = com cone e SC = sem cone. | 97 |
| Figura 43 – Comportamento da dissipação em função da distância entre transdutores, sendo CC = com cone e SC = sem cone. | 98 |
| Figura 44 – Comportamento do ATME em função da distância entre transdutores, sendo CC = com cone e SC = sem cone..... | 100 |
| Figura 45 – Comportamento do P_0 (em escala logarítmica) em função da distância entre transdutores, sendo CC = com cone e SC = sem cone. | 101 |
| Figura 46 – Mapa de fissuras das vigas do lote L1: lado 1 na cor preta e lado 2 na cor vermelha. | 104 |
| Figura 47 – Mapa de fissuras das vigas do lote L2: lado 1 na cor preta e lado 2 na cor vermelha. | 104 |
| Figura 48 – Mapa de fissuras das vigas do lote L3: lado 1 na cor preta e lado 2 na cor vermelha. | 104 |
| Figura 49 – Gráfico carga-deslocamento das vigas dos três lotes..... | 105 |
| Figura 50 – Gráfico carga-deformação das vigas do lote L1. | 106 |
| Figura 51 – Gráfico carga-deformação das vigas do lote L2. | 107 |
| Figura 52 – Gráfico carga-deformação das vigas do lote L3. | 107 |
| Figura 53 – Deformação das seções das vigas do lote L1 em diferentes momentos fletores (indicados na legenda, em kNm)..... | 108 |
| Figura 54 – Deformação das seções das vigas do lote L2 em diferentes momentos fletores (indicados na legenda, em kNm)..... | 108 |
| Figura 55 – Deformação das seções das vigas do lote L3 em diferentes momentos fletores (indicados na legenda, em kNm)..... | 109 |
| Figura 56 – Gráfico momento-curvatura das seções centrais das vigas..... | 110 |
| Figura 57 – Gráfico momento-curvatura das vigas. | 111 |
| Figura 58 – Gráfico da perda de rigidez efetiva das seções centrais das vigas. | 112 |
| Figura 59 – Gráfico da perda de rigidez efetiva das vigas. | 113 |

| | |
|---|-----|
| Figura 60 – Fissuras entre os transdutores na viga V23..... | 114 |
| Figura 61 – Sinais ultrassônicos obtidos durante os ensaios nas vigas do lote L1..... | 115 |
| Figura 62 – Sinais ultrassônicos obtidos durante os ensaios nas vigas do lote L2..... | 116 |
| Figura 63 – Sinais ultrassônicos obtidos durante os ensaios nas vigas do lote L3..... | 117 |
| Figura 64 – Aproximação da densidade espectral de energia experimental com a solução 3D infinita, onde as barras representam as flutuações previstas. | 118 |
| Figura 65 – Típico sinal ultrassônico difuso com a envoltória da densidade espectral de energia. | 119 |
| Figura 66 – Gráfico da difusividade em função do momento fletor das vigas do lote L1. | 120 |
| Figura 67 – Gráfico da difusividade em função do momento fletor das vigas do lote L2. | 121 |
| Figura 68 – Gráfico da difusividade em função do momento fletor das vigas do lote L3. | 121 |
| Figura 69 – Variação da difusividade antes do momento de fissuração. | 122 |
| Figura 70 – Comparação entre a deformação do aço (eixo da esquerda, em azul) e a difusividade (eixo da direita, em vermelho) em função do momento, na viga V31. | 123 |
| Figura 71 – Comparação entre a deformação do aço (eixo da esquerda, em azul) e a difusividade (eixo da direita, em vermelho) em função do momento, na viga V32. | 124 |
| Figura 72 – Variação da difusividade..... | 125 |
| Figura 73 – Gráfico da dissipação em função do momento fletor das vigas do lote L1. | 126 |
| Figura 74 – Gráfico da dissipação em função do momento fletor das vigas do lote L2. | 126 |
| Figura 75 – Gráfico da dissipação em função do momento fletor das vigas do lote L3. | 127 |
| Figura 76 – Variação da taxa de dissipação antes do momento de fissuração. | 128 |
| Figura 77 – Variação da dissipação..... | 129 |
| Figura 78 – Variação do P_0 antes do momento de fissuração. | 130 |
| Figura 79 – Gráfico do P_0 em função do momento fletor das vigas do lote L1..... | 131 |
| Figura 80 – Gráfico do P_0 em função do momento fletor das vigas do lote L2..... | 132 |
| Figura 81 – Gráfico do P_0 em função do momento fletor das vigas do lote L3..... | 132 |
| Figura 82 – Gráfico do ATME em função do momento fletor das vigas do lote L1. | 134 |
| Figura 83 – Gráfico do ATME em função do momento fletor das vigas do lote L2. | 134 |
| Figura 84 – Gráfico do ATME em função do momento fletor das vigas do lote L3. | 135 |
| Figura 85 – Variação do ATME antes do momento de fissuração..... | 136 |
| Figura 86 – Coeficientes de variação dos parâmetros difusividade, dissipação e ATME iniciais. | 136 |
| Figura 87 – Comparação entre a deformação do aço (eixo da esquerda, em azul) e o ATME (eixo da direita, em vermelho) em função do momento, na viga V13..... | 137 |

| | |
|---|-----|
| Figura 88 – Comparação entre a deformação do aço (eixo da esquerda, em azul) e o ATME (eixo da direita, em vermelho) em função do momento, na viga V32..... | 138 |
| Figura 89 – Variação do ATME..... | 139 |
| Figura 90 – Comparação entre os comportamentos da perda de rigidez e da difusividade, da viga V31..... | 141 |
| Figura 91 – Comparação entre os comportamentos da perda de rigidez e do ATME, da viga V31..... | 141 |
| Figura 92 – Correlação entre perda de rigidez e difusividade, lote L1..... | 142 |
| Figura 93 – Correlação entre perda de rigidez e difusividade, lote L2..... | 143 |
| Figura 94 – Correlação entre perda de rigidez e difusividade, lote L3..... | 143 |
| Figura 95 – Correlação entre perda de rigidez e ATME, lote L1..... | 144 |
| Figura 96 – Correlação entre perda de rigidez e ATME, lote L2..... | 144 |
| Figura 97 – Correlação entre perda de rigidez e ATME, lote L3..... | 145 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Domínios de dispersão, sendo d a dimensão média dos dispersores..... | 35 |
| Tabela 2 – Impedância média de materiais presentes no concreto..... | 37 |
| Tabela 3 – Tabela comparativa entre parâmetros utilizados em diferentes pesquisas. | 65 |
| Tabela 4 – Composição por metro cúbico de concreto. | 77 |
| Tabela 5 – Disposição dos lotes de acordo com as taxas de armadura. | 79 |
| Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão. | 94 |
| Tabela 7 – Ganhos utilizados em função da distância entre transdutores, sendo CC = com cone e SC = sem cone. | 95 |
| Tabela 8 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de dissipação..... | 99 |
| Tabela 9 – Variabilidade do fator P_0 , sendo CC = com cone e SC = sem cone..... | 101 |
| Tabela 10 – Cargas e momentos de fissuração e de ruptura experimentais. | 102 |
| Tabela 11 – Modos de ruptura das vigas. | 103 |
| Tabela 12 – Coeficiente de correlação entre a perda de rigidez e os parâmetros de difusão das vigas..... | 146 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI – American Concrete Institute
ARI – Alta resistência inicial
ATME – Tempo de Chegada da Energia Máxima
CV – Coeficiente de Variação
DTFT – Transformada Discreta de Fourier
END – Ensaios Não Destrutivos
EDP – Equação Diferencial Parcial
GPEND – Grupo de Pesquisa em Ensaios Não Destrutivos
LEE – Laboratório de Experimentação em Estruturas
LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT – Transformador Diferencial Variável Linear
RAA – Reação Álcali-Agregado
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
VPU – Velocidade de Pulso Ultrassônico

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------|--|
| a | Dimensão linear finita |
| A_0 | Amplitude inicial |
| A_1 | Amplitude de pico |
| A_2 | Amplitude de pico |
| A_s | Área de aço |
| $ATME$ | Valor do tempo de chegada da energia máxima |
| $ATME_f$ | Valor final do tempo de chegada da energia máxima |
| $ATME_r$ | Valor após a fissuração do tempo de chegada da energia máxima |
| $ATME_0$ | Valor inicial do tempo de chegada da energia máxima |
| b | Dimensão linear finita Base da viga |
| c | Dimensão linear finita |
| CV_e | Coefficiente de variação experimental do concreto |
| d | Dimensão média de dispersores Altura útil de uma seção de concreto armado |
| D | Diâmetro do transdutor Difusividade |
| D_f | Difusividade final |
| D_r | Difusividade após a fissuração |
| D_0 | Difusividade inicial |
| E | Densidade espectral de energia Módulo de elasticidade |
| \hat{E} | Densidade espectral de energia experimental |
| (EI) | Rigidez |
| $(EI)_{ef}$ | Rigidez efetiva |
| $(EI)_0$ | Rigidez inicial |
| f | Frequência |
| f_c | Frequência central |
| f_{ct} | Resistência à tração do concreto |
| f_{cm} | Resistência à compressão experimental do concreto |
| f_s | Frequência de amostragem |
| Δf | Largura da banda de frequência |

| | |
|--------------|---|
| I | Momento de inércia |
| I_c | Momento de inércia da seção bruta de concreto |
| k | Número da onda |
| l_0 | Comprimento do campo próximo de divergência |
| L | Distância de propagação Comprimento do vão |
| M | Momento fletor |
| M_d | Momento fletor de cálculo |
| M_I | Momento fletor no estádio I |
| M_{II} | Momento fletor no estádio II |
| M_{III} | Momento fletor no estádio III |
| M_k | Momento fletor característico |
| M_p | Momento fletor de plastificação |
| M_r | Momento fletor de fissuração |
| M_u | Momento fletor último ou de ruína |
| N | Número de pontos da janela de tempo |
| P | Densidade espectral de energia da fonte Carregamento concentrado |
| P_0 | Fator relacionado com a energia inicial depositada por um transdutor emissor |
| r | Distância entre transdutores Função da janela de tempo retangular Raio de curvatura |
| \mathbf{r} | Vetor posição |
| R_c | Resultante de compressão no concreto |
| $R_{c,t}$ | Resultante de tração no concreto |
| R_s | Resultante de tração no aço |
| R_p | Coeficiente de reflexão de uma onda em uma interface |
| s_e | Desvio padrão dos valores de resistência experimentais |
| t | Tempo |
| t_c | Tempo central |
| t_{end} | Ponto do tempo final da aproximação |
| t_{start} | Ponto do tempo inicial da aproximação |
| t_0 | Tempo inicial |
| Δt | Largura da janela de tempo |

| | |
|-----------------|---|
| T | Período |
| T_p | Coefficiente de transmissão de uma onda em uma interface |
| u | Deslocamento |
| v | Velocidade do pulso ultrassônico |
| w | Função da janela de tempo de Hann |
| x | Posição na direção do eixo x das coordenadas |
| x_0 | Coordenada de origem no eixo x das coordenadas |
| y | Posição na direção do eixo y das coordenadas |
| | Equação da linha elástica de deflexão em função do comprimento |
| y_t | Distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada |
| y_0 | Coordenada de origem no eixo y das coordenadas |
| z | Posição na direção do eixo z das coordenadas |
| z_0 | Coordenada de origem no eixo z das coordenadas |
| Z | Impedância |
| α | Fator de normalização entre janelas de tempo |
| | Coefficiente que relaciona a resistência à tração na flexão com a tração direta |
| a_{US} | Atenuação ultrassônica |
| a^*_{US} | Atenuação ultrassônica intrínseca |
| β | Domínio espacial de um corpo elástico-linear |
| γ | Ângulo de divergência |
| γ_f | Coefficiente de ponderação de ações |
| δ | Delta de Dirac |
| Δ | Deslocamento linear no centro do vão |
| ϵ_c | Deformação do concreto |
| ϵ_{cu} | Deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura |
| ϵ_{c2} | Deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico |
| ϵ_s | Deformação da armadura longitudinal de flexão |
| $\epsilon_{s'}$ | Deformação da armadura porta-estribo |
| θ | Ângulo de incidência |
| κ | Curvatura |
| λ | Comprimento de onda |
| ρ | Densidade |
| | Taxa de armadura |
| σ | Taxa de dissipação |

| | |
|-------------|--------------------------------------|
| σ_c | Tensão de compressão no concreto |
| σ_f | Taxa de dissipação final |
| σ_r | Taxa de dissipação após a fissuração |
| σ_t | Tensão de tração no aço |
| σ_0 | Taxa de dissipação inicial |
| σ^2 | Variância |
| \emptyset | Diâmetro da armadura |
| ω | Frequência da onda |
| ∇^2 | Operador de Laplace |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 23 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO..... | 26 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 26 |
| 1.2.1 Objetivo geral | 26 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 26 |
| 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO | 27 |
| 2 ENSAIO DE ULTRASSOM | 28 |
| 2.1 ULTRASSOM..... | 28 |
| 2.1.1 Onda ultrassônica..... | 29 |
| 2.1.2 Tipos de onda | 29 |
| 2.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NO CONCRETO..... | 31 |
| 2.2.1 Atenuação ultrassônica | 31 |
| 2.2.1.1 Divergência..... | 32 |
| 2.2.1.2 Absorção | 33 |
| 2.2.1.3 Dispersão..... | 33 |
| 2.2.2 Impedância acústica | 37 |
| 2.2.2.1 Transmissão, reflexão e refração | 37 |
| 2.3 ENSAIO DE ULTRASSOM..... | 38 |
| 2.3.1 Transmissão e medição de ondas | 39 |
| 2.3.1.1 Tipos de transmissão..... | 40 |
| 3 DIFUSÃO DA ENERGIA DE ONDAS ULTRASSÔNICAS | 42 |
| 3.1 MÉTODO DA DIFUSÃO ULTRASSÔNICA | 43 |
| 3.1.1 Soluções analíticas da Equação da Difusão..... | 46 |
| 3.1.2 Processamento do sinal ultrassônico..... | 49 |
| 3.2 APLICAÇÕES DO MÉTODO DE ULTRASSOM DIFUSO..... | 53 |
| 3.2.1 Fatores externos que influenciam nos parâmetros de difusão | 61 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 3.2.1.1 | Histórico de tensões | 61 |
| 3.2.1.2 | Distância entre transdutores | 62 |
| 3.2.1.3 | Armaduras | 63 |
| 3.2.2 | Considerações para aplicação do método de difusão ultrassônica | 63 |
| 4 | FUNDAMENTOS DE CONCRETO ARMADO | 66 |
| 4.1 | VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDOS À FLEXÃO SIMPLES | 66 |
| 4.1.1 | Rigidez à flexão | 69 |
| 4.2 | CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DE FISSURAÇÃO | 72 |
| 5 | MATERIAIS E MÉTODOS | 74 |
| 5.1 | MATERIAIS E EQUIPAMENTOS | 75 |
| 5.1.1 | Composição do concreto | 75 |
| 5.1.2 | Características do aço | 75 |
| 5.1.3 | Equipamento de Ultrassom | 75 |
| 5.1.4 | Receptor pontual | 76 |
| 5.2 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 77 |
| 5.2.1 | Produção do concreto | 77 |
| 5.2.2 | Vigas de concreto armado | 78 |
| 5.2.3 | Ensaio preliminares | 81 |
| 5.2.4 | Ensaio de flexão | 82 |
| 5.2.4.1 | Determinação das curvaturas | 83 |
| 5.2.4.2 | Cálculo das rigidezes efetivas | 84 |
| 5.2.5 | Ensaio de ultrassom | 84 |
| 5.3 | PROCESSAMENTO DE SINAIS | 86 |
| 5.3.1 | Determinação da densidade espectral de energia experimental | 86 |
| 5.3.2 | Recuperação dos parâmetros de difusão | 87 |
| 5.3.3 | Parâmetros de entrada | 90 |
| 5.3.4 | Pós-processamento e análise dos resultados | 92 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 94 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 6.1 | CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO | 94 |
| 6.2 | ENSAIOS PRELIMINARES | 94 |
| 6.2.1 | Distância entre transdutores | 94 |
| 6.2.2 | Utilização do receptor pontual | 97 |
| 6.2.2.1 | Difusividade | 97 |
| 6.2.2.2 | Dissipação | 98 |
| 6.2.2.3 | ATME | 99 |
| 6.2.2.4 | Fator P_0 | 100 |
| 6.2.2.5 | Conclusão | 102 |
| 6.3 | ENSAIOS DE FLEXÃO | 102 |
| 6.3.1 | Carregamento e esforços de fissuração e de ruptura | 102 |
| 6.3.2 | Modos de ruptura | 103 |
| 6.3.3 | Mapas de fissuração | 104 |
| 6.3.4 | Deslocamentos | 105 |
| 6.3.5 | Deformações | 106 |
| 6.3.5.1 | Deformação das seções | 108 |
| 6.3.6 | Curvatura | 109 |
| 6.3.7 | Perda de rigidez | 111 |
| 6.4 | ENSAIO DE ULTRASSOM | 114 |
| 6.4.1 | Formato de onda | 114 |
| 6.4.2 | Processamento de sinais | 118 |
| 6.4.3 | Parâmetros de difusão | 120 |
| 6.4.3.1 | Difusividade | 120 |
| 6.4.3.2 | Dissipação | 125 |
| 6.4.3.3 | Fator P_0 | 130 |
| 6.4.3.4 | ATME | 133 |
| 6.5 | CORRELAÇÕES | 140 |

| | |
|--|------------|
| 7 CONCLUSÃO | 147 |
| 7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 149 |
| REFERÊNCIAS | 150 |
| APÊNDICE A – Composição granulométrica dos agregados | 157 |
| APÊNDICE B – Formatos de onda | 159 |
| APÊNDICE C – Ganhos | 164 |
| APÊNDICE D – Gráficos comparativos entre a deformação do aço e os parâmetros de difusividade e ATME | 167 |
| APÊNDICE E – Gráficos comparativos entre a perda de rigidez e os parâmetros de difusividade e ATME | 170 |
| APÊNDICE F – Análise de dispersão dos parâmetros de difusão dos ensaios preliminares | 173 |
| ANEXO A – Laudo Técnico do Cimento | 175 |
| ANEXO B – Especificações dos extensômetros | 176 |

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil e sua disseminação em todo o mundo evidencia a importância desse material para a infraestrutura mundial. De acordo com Carvalho e Filho (2015), isso se deve, principalmente, à sua alta resistência à compressão e à sua boa trabalhabilidade e adaptação a diversas formas. Além disso, este é um material versátil e durável, que necessita de baixa manutenção (se projetado e executado de forma adequada) e de pouca energia para sua produção (se comparado com outros materiais, como o aço).

São notáveis a evolução e as melhorias das propriedades do concreto ao longo do tempo, inclusive com o surgimento dos concretos de alto desempenho, que são chamados assim, pois além da alta resistência à compressão, que pode superar 50 MPa, há a melhoria de outras propriedades que elevam a durabilidade das estruturas (CARVALHO; FILHO, 2015).

Devido a esta prevalência, estruturas de concreto, como fundações, edifícios, pontes, estradas e barragens, são atualmente foco especial de uma perspectiva de monitoramento, acompanhamento, avaliação e manutenção das condições de serviço, tanto durante o processo construtivo quanto ao longo da vida útil. Segundo Carelli (2014), a falta de capacitação da mão-de-obra, aliada a erros e a negligências nas fases de projeto e de execução das obras e ao mau uso das edificações, pode levar à ocorrência de problemas na construção e ao surgimento de manifestações patológicas que influenciam na durabilidade e na vida útil da estrutura.

Em elementos de concreto armado submetidos à flexão, como é o caso de vigas e de longarinas, é comum o aparecimento de fissuras – manifestações características de estruturas de concreto, sendo um dos danos de ocorrência mais comuns e que mais chamam a atenção do usuário. Fissuras são causadas por diferentes fatores, que tanto podem ser internos e intrínsecos ao material, quanto externos, relacionados ao ambiente e às ações aplicadas (SOUZA; RIPPER, 1998). A progressão das fissuras leva à perda de propriedades mecânicas e de rigidez da estrutura, uma vez que ocorre a diminuição da seção transversal e a alteração de sua rigidez efetiva, podendo, inclusive, levar à ruptura.

Surge, então, a necessidade do desenvolvimento e do aprimoramento de técnicas que avaliem qualitativa e quantitativamente os danos e, por consequência, o desempenho de estruturas. Essa avaliação pode ser feita por meio de ensaios destrutivos e não-destrutivos; estes últimos, foco do presente trabalho.

Ensaaios não destrutivos (END) possibilitam caracterizar uma estrutura, com a vantagem de causar pouco ou nenhum dano a esta, sendo uma solução prática e, muitas vezes, de baixo custo. A norma americana ACI 228:2013 define END como um ensaio geralmente não invasivo, sendo útil para a determinação de propriedades do concreto, para o controle de qualidade de novas construções e para a avaliação das condições de estruturas novas e velhas, inclusive como garantia da qualidade de reparos.

Atualmente, existem diversas técnicas de END sendo estudadas e utilizadas ao redor do mundo, cada uma com suas limitações e suas vantagens. Segundo Andreucci (2018), é necessária a elaboração de um estudo de viabilidade e de aplicabilidade para identificar o método mais adequado para cada caso. Dentro dos END, destaca-se o Ensaio de Ultrassom, que se baseia no princípio de propagação de ondas ultrassônicas em um meio sólido para inferir informação sobre sua microestrutura.

Diversos parâmetros obtidos a partir de dados do ensaio de ultrassom vêm sendo utilizados para caracterizar estruturas de concreto. Os primeiros parâmetros utilizados se baseiam na propagação direta da onda entre o transdutor emissor e o receptor, como é o caso da velocidade do pulso ultrassônico (VPU), determinada a partir do tempo de chegada da primeira onda do pulso ultrassônico. Entretanto, devido à natureza altamente não-homogênea do concreto (que é constituído por uma matriz de cimento, agregados miúdos e graúdos, água e, muitas vezes, bolhas de ar incorporado), resultados utilizando parâmetros da onda direta são usualmente válidos apenas para conclusões qualitativas, baseadas sobretudo em fórmulas empíricas e sem correlação direta com parâmetros de integridade estrutural (PHILIPPIDIS; AGGELIS, 2004; AGGELIS; SHIOTANI, 2007).

As heterogeneidades no concreto incluem, além dos seus materiais constituintes, possíveis danos, como microfissuras e fissuras, e apresentam múltiplas escalas de comprimento. Essa característica multifásica leva a uma grande dispersão das ondas ultrassônicas que possuem comprimentos de onda na ordem de grandeza igual ou menor à dimensão das heterogeneidades (frequências tipicamente acima de 200 kHz). Esse efeito de múltipla dispersão proporciona chegadas de ondas tardias e aleatórias (chamadas de ondas *codas*), promovendo uma rápida formação de um campo difuso, no qual as ondas percorrem um caminho muito mais longo do que o caminho direto, sendo assim mais sensíveis a pequenas mudanças que ocorrem no meio de propagação (DEROO et al., 2010; SCHURR et al., 2011; PLANÈS; LAROSE, 2013).

Devido à grande complexidade do concreto, é difícil descrever em detalhes a fase e a amplitude de ondas *codas*, que aparecem como resultado de processos aleatórios. Contudo, a

evolução temporal da densidade média de energia ultrassônica pode ser aproximadamente modelada pela equação da difusão, similar à difusão do calor em sólidos, sendo este o método de aproximação por difusão da energia de ondas ultrassônicas ou, simplesmente, método da difusão ultrassônica (PAGE et al., 1995; WEAVER, 1998). Dessa maneira, o método da difusão ultrassônica descreve a evolução, no tempo, da densidade espectral de energia de um campo de ondas ultrassônicas, após este ter sido fortemente disperso pelo meio de propagação (caracterizando um processo estocástico).

Este método vem atraindo muita atenção, especialmente, por sua capacidade de avaliar quantitativamente os danos de pequena escala na microestrutura. Estudos recentes mostram um grande potencial do uso de ondas ultrassônicas difusas para caracterizar as condições de integridade do concreto, como as pesquisas desenvolvidas por Deroo et al. (2010), que avaliaram danos de microfissuras no concreto causados pela reação álcali-agregado e por efeitos térmicos; por Quiviger et al. (2012), que avaliaram a capacidade de detecção, de localização e de caracterização de microfissuras reais presentes em revestimentos de concreto; por In et al. (2013), que monitoraram a progressão da auto cicatrização de concreto fissurado *in situ*; e por Seher et al. (2012) e In et al. (2016), que realizaram análises numéricas e experimentais para determinar a profundidade de fissuras superficiais no concreto; dentre diversos outros pesquisadores que deram importantes contribuições para o método de difusão ultrassônica.

No tocante à avaliação da integridade de estruturas, algumas metodologias já foram propostas para estimar a rigidez equivalente de elementos danificados por meio de análises dinâmicas, como é o caso do trabalho desenvolvido por Almeida (2005), que realizou uma análise modal experimental mediante ensaios dinâmicos e avaliou as variações dos valores de frequência natural dos elementos ensaiados como forma de identificar a presença e a magnitude de danos e, assim, determinar a rigidez equivalente de peças fissuradas.

O Grupo de Pesquisa em Ensaios Não Destrutivos (GPEND) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no qual este trabalho foi desenvolvido, possui pesquisas desenvolvidas no âmbito da análise do comportamento de ondas ultrassônicas em elementos fissurados de argamassa e de concreto, relacionando parâmetros ultrassônicos nos domínios do tempo e da frequência para a detecção de danos de fissuração e para a análise da perda de rigidez de estruturas fissuradas (MEDEIROS, 2007; CARELLI, 2014; HOFMANN, 2015; SILVA, 2017). Essas pesquisas mostraram o potencial da utilização do ensaio de ultrassom na

caracterização da integridade estrutural de elementos de concreto e abriram caminho para futuros trabalhos.

1.1 MOTIVAÇÃO

Com base nas referências bibliográficas estudadas, observou-se que parâmetros relacionados com o método da difusão ultrassônica podem ser capazes de caracterizar a perda de rigidez devido a danos de fissuração do concreto. Além da detecção da existência de danos, é importante quantificar a sua influência no comportamento estrutural do elemento. Assim, como relataram Quiviger et al. (2012) e In et al. (2013), os parâmetros de difusão podem ser tratados como indicadores úteis para identificar como um conjunto de parâmetros se desenvolve em função de um tipo de dano presente.

A detecção de danos em um estágio inicial de degradação pode reduzir significativamente os custos de manutenção e evitar falhas de estruturas. O método da difusão ultrassônica tem sido bem-sucedido na detecção de fissuras em um ambiente de laboratório, mostrando um alto potencial para medições em campo de estruturas reais de concreto.

Por ser um assunto atual e recente, e considerando que não foram encontrados estudos direcionados em estabelecer correlações entre o comportamento estrutural e os parâmetros de difusão, a avaliação por meio do ultrassom de vigas de concreto armado submetidas a carregamentos pode possibilitar o estabelecimento de correlações entre os parâmetros recuperados do método da difusão ultrassônica e a perda de rigidez, visando possíveis aplicações práticas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a perda de rigidez de vigas de concreto armado submetidas à flexão por meio do ensaio de ultrassom e da aplicação do método de aproximação da difusão da energia de ondas ultrassônicas.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) avaliar a influência da distância entre os transdutores nos parâmetros de difusão;
- b) avaliar a influência da utilização do transdutor receptor pontual;
- c) avaliar a influência dos parâmetros Δt e Δf na análise tempo-frequência, identificando os melhores valores para esses parâmetros;
- d) verificar a influência do processo de formação e de propagação de fissuras nos parâmetros de difusão;
- e) verificar a influência das armaduras, por meio da comparação entre vigas com diferentes taxas de armadura;
- f) correlacionar os parâmetros de difusão com a rigidez efetiva das vigas e identificar os parâmetros mais adequados para representar a perda de rigidez.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em oito capítulos, sendo eles: Introdução, Ensaio de ultrassom, Difusão da energia de ondas ultrassônicas, Fundamentos de concreto armado, Metodologia, Resultados e discussões, Conclusão e Referências.

No Capítulo 1, é apresentada a introdução do trabalho, que contém as motivações para realização deste, bem como os objetivos geral e específicos. No Capítulo 2, estão descritas as bases teóricas de propagação de ondas ultrassônicas, tanto em um âmbito geral, como particularidades referentes à propagação no concreto, um meio heterogêneo. No Capítulo 3, é apresentado o método da difusão ultrassônica, contendo suas premissas, possíveis soluções analíticas e trabalhos recentes que utilizaram esse método. Já no Capítulo 4, é mostrada uma visão geral sobre o processo de perda de rigidez de vigas de concreto armado submetidas à flexão simples, descrevendo os estádios de comportamento e a rigidez à flexão de vigas.

Em seguida, no Capítulo 5, é descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, incluindo os materiais e os procedimentos experimentais realizados. No Capítulo 6, são apresentados os resultados obtidos e as discussões referentes a eles, tanto em relação aos ensaios de flexão quanto aos ensaios de ultrassom e às correlações entre os parâmetros de difusão e a perda de rigidez das vigas. Algumas conclusões e recomendações são feitas no Capítulo 7. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração deste trabalho.

2 ENSAIO DE ULTRASSOM

O Ensaio de Ultrassom se baseia no princípio da propagação de ondas mecânicas (ou de tensão) em um meio de interesse e auxilia na avaliação das condições internas do material, suas propriedades mecânicas e possíveis não homogeneidades. Sua frequente utilização se deve ao fato de que ondas ultrassônicas estão diretamente relacionadas com o comportamento mecânico dos materiais (PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

Andreucci (2018) cita como vantagens deste método sua alta sensibilidade para detectar pequenas discontinuidades internas (muitas vezes não detectáveis por outros END); a não necessidade de planos especiais de segurança, como no caso de ensaios por radiação; a localização, interpretação e caracterização das discontinuidades encontradas, como seu tamanho e sua profundidade; a possível mecanização dos processos, garantindo que resultados obtidos no ensaio possam ser reproduzidos; entre outras.

Nas próximas seções deste capítulo, serão descritas propriedades das ondas mecânicas, dentro das quais incluem-se as ondas ultrassônicas. Serão apresentados parâmetros e características que descrevem sua propagação, tanto em um âmbito geral como particularidades referentes à propagação no concreto. E, por fim, serão descritos processos referentes ao ensaio de ultrassom no concreto.

2.1 ULTRASSOM

A onda sonora (ou simplesmente som), por ser um tipo de onda mecânica, é uma perturbação que se desloca com uma velocidade definida através de um meio material gasoso, líquido ou sólido, provocando um movimento oscilatório das partículas em torno de suas respectivas posições de equilíbrio e transmitindo energia sem que haja o transporte de matéria de uma região para outra do meio. O ouvido humano é sensível a sons com frequência entre 20 e 20.000 Hz, conhecido como intervalo audível. Os ultrassons, de interesse para esse estudo, são ondas sonoras com frequência superior à 20 kHz, inaudíveis para o homem (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

2.1.1 Onda ultrassônica

Ondas ultrassônicas, por se tratarem de ondas mecânicas, podem ser descritas por uma função de onda do tipo $u(x,t)$, que fornece o deslocamento instantâneo (u) de uma partícula de uma posição do meio (x), no tempo (t), conforme a Equação (1), que tem como base o princípio fundamental da dinâmica aplicada, quando um esforço é aplicado a uma partícula no tempo, de acordo com a lei de Hooke (YOUNG; FREEDMAN, 2008; CHEEKE, 2012).

$$u(x,t) = A_0 \cos(kx - \omega t), \quad (1)$$

onde A_0 é a amplitude inicial, ω é a frequência de onda e k é o número da onda.

Sendo v a velocidade de propagação, pode-se definir as seguintes relações básicas relacionadas à propagação de ondas mecânicas:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \quad (2)$$

$$v = f\lambda, \quad (3)$$

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (4)$$

onde T é o período, λ é o comprimento de onda e f é a frequência, parâmetro medido em número de ciclos por segundo (unidade conhecida como Hertz, Hz), que representa a quantidade de vibração gerada (PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

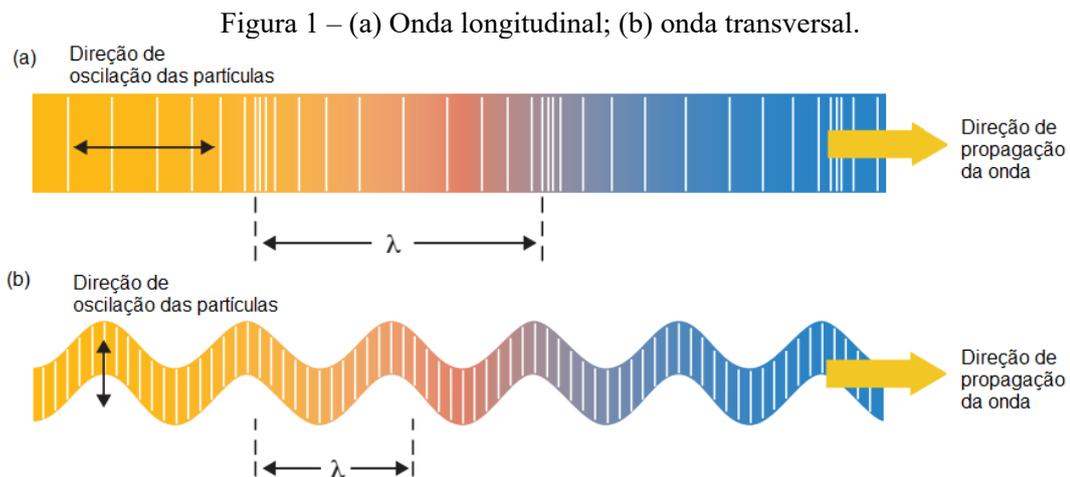
A partir da Equação (3), é possível calcular o comprimento de onda λ , visto que são conhecidas a frequência, que depende somente da fonte emissora, e a velocidade de propagação, que é uma característica do material e depende somente do modo de vibração.

2.1.2 Tipos de onda

Considerando que o meio de propagação da onda é elástico, no qual as partículas estão rigidamente ligadas entre si e podem oscilar em qualquer direção, as ondas ultrassônicas podem ser classificadas em três tipos: ondas longitudinais, transversais e superficiais

(BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006; ANDREUCCI, 2018; PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

Nas ondas longitudinais (de compressão ou P), as partículas vibram na direção de propagação da onda, gerando “zonas de compressão” e “zonas diluídas” (Figura 1a). O comprimento de onda λ é definido como a distância entre duas zonas de compressão ou duas zonas diluídas. Já nas ondas transversais (de cisalhamento ou S), as partículas oscilam na direção perpendicular à propagação, deslocando-se apenas verticalmente (Figura 1b). As distâncias entre dois “vales” ou dois “picos” definem o comprimento de onda λ . Por fim, as ondas superficiais (de Rayleigh ou R) se propagam na superfície dos sólidos de forma elíptica. Por se tratar de um movimento oscilatório complexo na superfície entre dois meios diferentes, a velocidade de propagação das ondas- R é inferior à de uma onda transversal ou longitudinal.



Fonte: Olympus (2017).

A teoria de ondas apresentada se aplica a ondas planares em um meio homogêneo, isotrópico, elástico, linear e infinito (PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018), sendo uma boa aproximação para muitos materiais, embora essas hipóteses não representem a realidade – particularmente no caso do concreto, cuja anisotropia é baixa em especial devido às armaduras, aos materiais que o compõem e suas dimensões finitas.

Como será visto a seguir, a grande heterogeneidade do concreto armado e de seus elementos constituintes gera um alto nível de dispersão e de dissipação de energia associados à atenuação, cujas consequências devem ser levadas em consideração ao analisar informações obtidas nas medições.

2.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NO CONCRETO

Ondas ultrassônicas se propagam com diferentes velocidade e atenuação através de diferentes materiais. A velocidade de propagação (v) é a razão entre a distância de propagação (L) e o tempo (t), como apresentado na Equação (5),

$$v = \frac{L}{t}. \quad (5)$$

A velocidade de propagação do pulso ultrassônico depende, primariamente, das propriedades elásticas e da densidade do material, e é praticamente independente de sua geometria (PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018). Dessa forma, se a massa do material e a velocidade da propagação do pulso ultrassônico são conhecidas, é possível determinar suas propriedades elásticas. Todavia, por ser definida no ensaio ultrassônico a partir da primeira perturbação detectável no sinal do pulso da onda, a velocidade do pulso ultrassônico é um dos parâmetros menos sensíveis a pequenas variações internas do material (WEAVER; SACHSE, 1995; SILVA, 2017).

A atenuação ultrassônica, α_{us} , dada em decibéis (ou dB), é um fenômeno que surge em materiais heterogêneos, como é o caso do concreto, causando a redução da amplitude da onda, podendo, assim, ser definida como a perda de amplitude entre dois picos sucessivos da onda (A_1 e A_2) na distância L (HELLIER, 2001; PHILIPPIDIS; AGGELIS, 2004), conforme Equação (6):

$$\alpha_{us} = \frac{20}{\Delta L} \log \left(\frac{A_1}{A_2} \right). \quad (6)$$

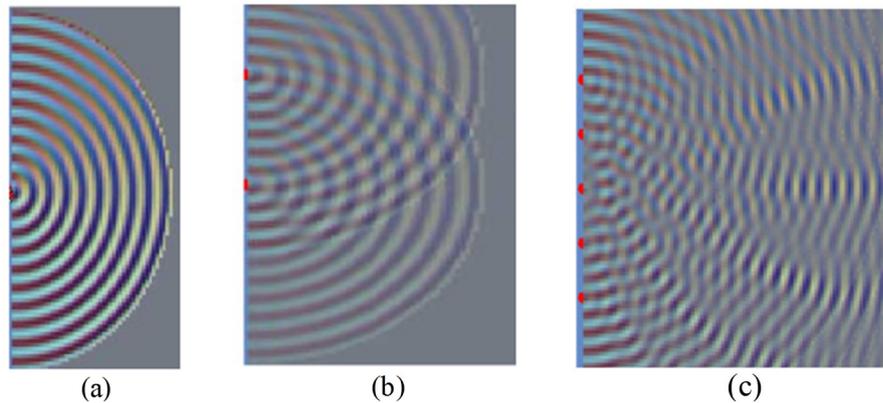
2.2.1 Atenuação ultrassônica

À medida que uma onda de tensão se propaga através do concreto, a energia de propagação decresce com o aumento da distância percorrida. Esse fenômeno é conhecido como atenuação e ocorre devido a três fatores: divergência geométrica, absorção (ou dissipação) e dispersão (SCHICKERT; KRAUSE, 2010; PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

2.2.1.1 Divergência

A divergência geométrica está ligada com a geração e com o tipo de onda (ANDREUCCI, 2018). O cristal piezoelétrico que gera as ondas ultrassônicas pode ser considerado como infinitos pontos oscilantes, sendo que cada ponto produz uma onda esférica que se propaga no meio, conforme representado na Figura 2.

Figura 2 – Geração e propagação de ondas ultrassônicas próximo aos cristais piezelétricos (identificados pelos pontos em vermelho).

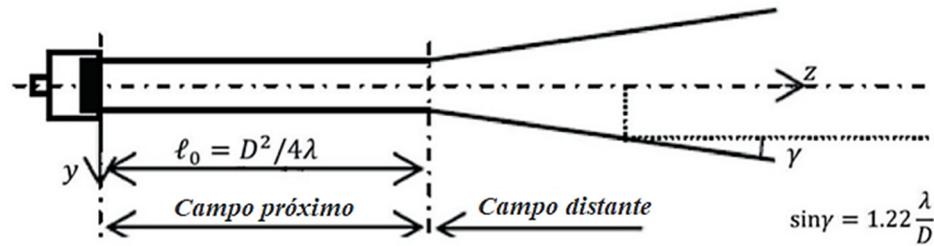


Fonte: Andreucci (2018).

Essa zona de propagação é definida como “campo próximo”, caracterizado por uma grande interferência entre ondas nas proximidades do cristal e, à medida que elas se afastam, o feixe se estabiliza, formando uma só frente de onda. Em seguida, identifica-se o “campo distante”, no qual o feixe ultrassônico se diverge em relação ao eixo central, diminuindo de intensidade devido ao fenômeno de atenuação. O ângulo de divergência (γ) aumenta de acordo com o comprimento de onda e decresce de acordo com o diâmetro do transdutor (ANDREUCCI, 2018; PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

Segundo Andreucci (2018), pequenas discontinuidades são difíceis de serem detectadas no campo próximo. Após o limiar entre o campo próximo e o distante, é possível detectar algumas discontinuidades maiores e, à medida que a onda se afasta da origem, se torna mais fácil a detecção de outras discontinuidades menores, desde que compatíveis com o comprimento de onda do feixe. Uma representação esquemática de um feixe ultrassônico está apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Descrição esquemática de um feixe ultrassônico gerado por um transdutor plano de diâmetro D .



Fonte: Payan, Abraham e Garnier (2018), adaptado.

2.2.1.2 Absorção

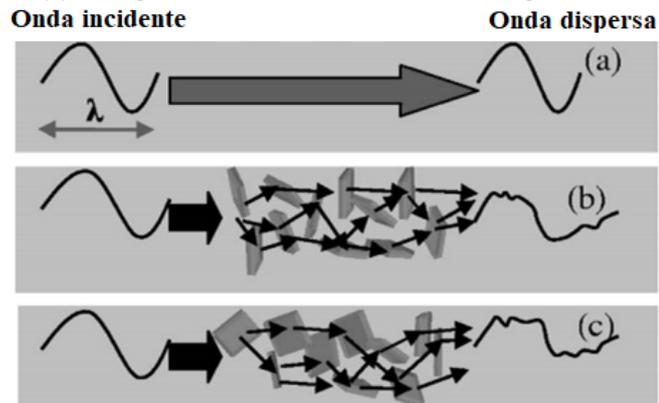
A absorção ocorre como resultado da conversão de energia mecânica em energia de calor devido ao atrito interno do material, que está ligado à sua viscoelasticidade (SCHICKERT; KRAUSE, 2010). Esse fenômeno é similar à dissipação, que também representa a conversão de energia mecânica em energia de calor (PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

A taxa de absorção da energia está vinculada ao material pelo qual a onda se propaga e é linearmente dependente da frequência (HELLIER, 2001), porém a uma taxa menor do que a dispersão (KRAUTKRÄMER; KRAUTKRÄMER, 1990). Dessa forma, haverá uma maior absorção de ondas de altas frequências. Para frequências mais baixas, ocorre uma maior “penetração” da onda no material, uma vez que a perda de energia por absorção será menor.

2.2.1.3 Dispersão

O fenômeno de dispersão de ondas ultrassônicas no concreto resulta do fato de que este não é estritamente homogêneo e corresponde ao redirecionamento de uma fração da energia da onda ultrassônica que incide em um elemento dispersor (como agregados, fissuras, vazios ou múltiplas fases no interior do material) em outras direções de propagação, por meio da reflexão, da refração e da transmissão da onda (KRAUTKRÄMER; KRAUTKRÄMER, 1990; SCHICKERT; KRAUSE, 2010), como representado na Figura 4.

Figura 4 – Propagação em um meio (a) sem elementos dispersores, (b) com dispersores distribuídos e (c) com posicionamento diferente dos dispersores.



Fonte: Aggelis e Shiotani (2007), adaptado.

Em um meio homogêneo, a energia de onda viaja em linha reta entre o transmissor e o receptor, sem dispersão (Figura 4a). Entretanto, à medida que se aumentam as heterogeneidades (Figura 4b e Figura 4c), a presença de elementos dispersores distribui a energia para vários caminhos de diferentes comprimentos, distorcendo o formato de onda. O efeito da dispersão é diferente da absorção – a energia não é dissipada e convertida em calor, mas sim transformada em formatos de onda atrasados e aleatórios (PLANÈS; LAROSE, 2013) – e corresponde à maior parcela da atenuação intrínseca (ANUGONDA; WIEHN; TURNER, 2001).

O tempo de propagação da onda dependerá da verdadeira distância percorrida, resultando na chegada não simultânea dos componentes de energia. Estes, ao chegarem no receptor, apresentarão amplitudes menores e atraso do pico máximo. Diferentes arranjos dos elementos dispersores resultam em diferentes formatos de onda e, devido à dispersão, ocorre a perda das correlações espaciais e temporais entre o campo de onda inicial e as ondas dispersas, criando um campo difuso. A ocorrência desse fenômeno depende do comprimento de onda, do formato e tamanho dos dispersores, da diferença entre as impedâncias acústicas, e das propriedades mecânica e de densidades do concreto e agregados (ANDREUCCI, 2018; COX; D'ANTONIO, 2004; SHIOTANI; AGGELIS, 2008).

Payan, Abraham e Garnier (2018) descrevem três campos de dispersão, em razão da dimensão média de um dispersor e da frequência de onda usada no ensaio, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Domínios de dispersão, sendo d a dimensão média dos dispersores.

| Domínio | λ | f | Características |
|-------------|---------------------|-----------------|--|
| Geométrico | $\lambda \ll d$ | 1000 - 5000 kHz | Geralmente não utilizado em ensaios de ultrassom no concreto |
| Estocástico | $\lambda \approx d$ | 50 - 1000 kHz | Domínio com maior índice de dispersão |
| Rayleigh | $\lambda > d$ | 20 - 50 kHz | Dispersores não influenciam na propagação da onda |

Fonte: Payan, Abraham e Garnier (2018), adaptado.

A máxima dispersão das ondas ultrassônicas ocorre no domínio estocástico, quando o comprimento de onda é aproximadamente igual ao tamanho do agente dispersor. Por exemplo, uma onda de frequência de 200 kHz se propagando com velocidade de 4.000 m/s no concreto, o sistema atuará no domínio estocástico com comprimento de onda igual a 20 mm, que se aproxima do diâmetro máximo comum de agregados. Nesses casos, a sensibilidade do ensaio ultrassônico à presença de elementos dispersores é maior, uma vez que a onda irá interagir com essas heterogeneidades diversas vezes e percorrer um caminho maior antes de chegar ao receptor, acumulando informações sobre o meio de propagação durante o processo (SCHURR et al., 2011). Pequenas mudanças no meio, que podem não ter uma influência detectável na primeira chegada, são “amplificadas” pelas múltiplas dispersões e podem, então, ser detectadas na porção difusa da onda (GRÊT; SNIEDER; SCALES, 2006).

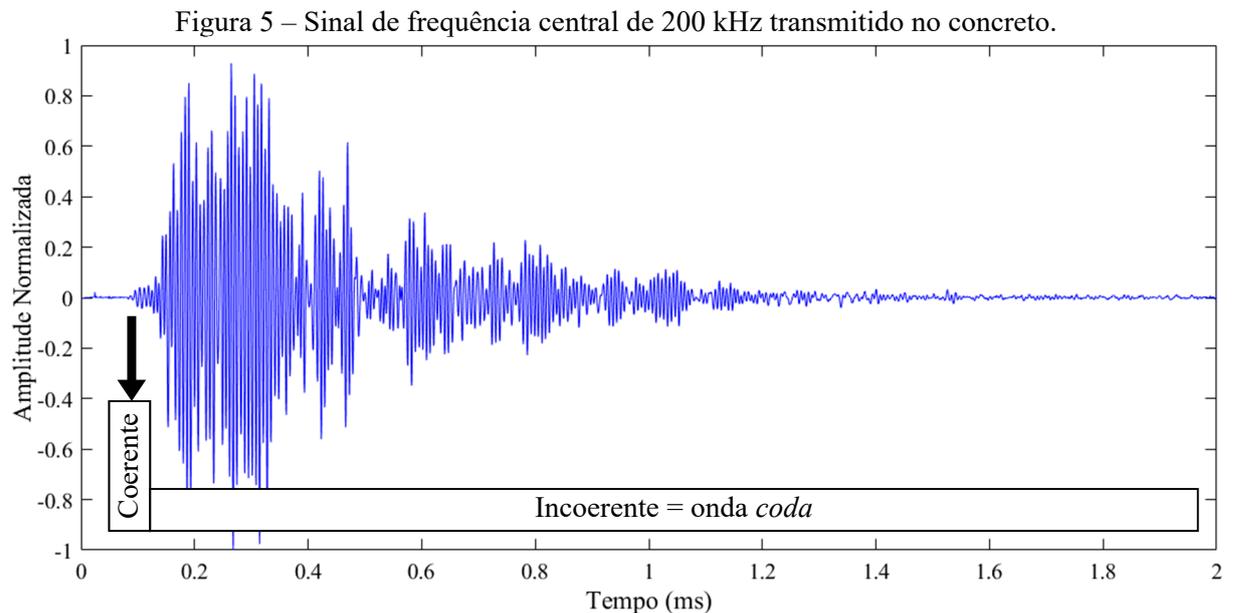
A absorção e a dispersão representam uma atenuação intrínseca $\alpha^*_{US}(\omega)$ induzida pela perda de energia devido à interação entre as ondas e a microestrutura do material. Isso gera uma perda exponencial da intensidade do sinal acústico. Dessa forma, para ondas esféricas, a equação de onda $u(\omega, x, t)$ pode ser definida de acordo com o tempo t , a posição x e a frequência ω de propagação, como mostrada na Equação (7) (PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

$$u(\omega, x, t) = A_0 e^{-\alpha^*_{US} x} \cos(\omega t - kx) \quad (7)$$

Como o concreto é um meio altamente heterogêneo, a propagação de ondas nesse material é continuamente sujeita à dispersão por agregados, poros e defeitos internos, sendo essa a causa mais proeminente de atenuação de um pulso ultrassônico no concreto

(SCHICKERT; KRAUSE, 2010). A escala das dimensões das fases citadas acima varia de alguns micrômetros até vários centímetros, influenciando a propagação de praticamente qualquer frequência.

Na Figura 5 está ilustrado um exemplo de sinal de uma onda ultrassônica no concreto, que, no momento em que atinge o transdutor receptor, é transformado em uma forma de onda complexa devido ao alto nível de atenuação, contendo múltiplas ondas de compressão e de cisalhamento (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A primeira parte da onda representada na Figura 5, identificada por uma seta, corresponde à chegada da onda direta entre o transdutor transmissor e o receptor (chamada de onda coerente), trazendo apenas informações sobre o estado da microestrutura no caminho direto entre os transdutores. A segunda parte, ou seja, o restante do sinal, corresponde à porção difusa ou incoerente, também chamada de “*coda*”, sendo composta por ondas de chegada aleatória e atrasada, que se sobrepõem como resultado de múltipla dispersão e reflexão.

O caminho das ondas incoerentes está relacionado com dispersores encontrados durante a propagação, sendo, portanto, considerado um fenômeno aleatório. Isso implica em uma abordagem estatística dos dados ultrassônicos por meio do cálculo de valores médios para diversas medições independentes (PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

2.2.2 Impedância acústica

A impedância acústica de um material está relacionada com sua resistência à passagem de ondas ultrassônicas, sendo definida pela relação entre a densidade do material (ρ) e a velocidade de vibração das partículas (v) de um determinado ponto (ANDREUCCI, 2018; PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018), conforme a Equação (8),

$$Z = \rho v . \quad (8)$$

As impedâncias de alguns materiais presentes no concreto estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Impedância média de materiais presentes no concreto.

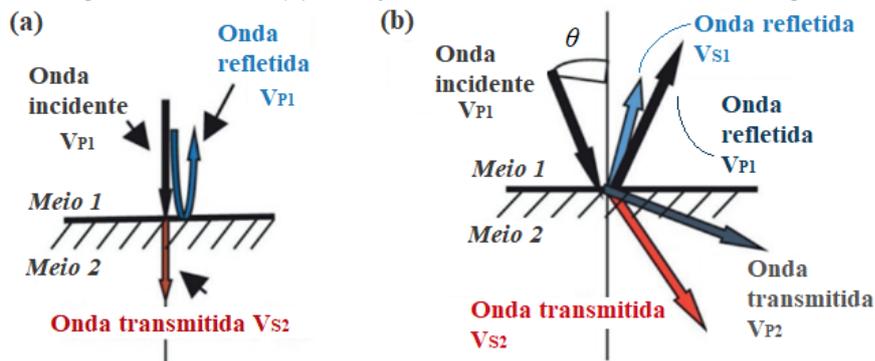
| Material | Impedância Acústica (kg/m²·s) |
|--------------------|---|
| Ar | 0,0004 x 10 ⁶ |
| Água (20°C) | 1,5 x 10 ⁶ |
| Aço | 45 x 10 ⁶ |
| Concreto | 11 x 10 ⁶ |
| Agregado Granítico | 17 x 10 ⁶ |

Fonte: Payan, Abraham e Garnier (2018), Schickert e Krause (2010).

2.2.2.1 Transmissão, reflexão e refração

Ao incidir em uma interface entre dois meios materiais, parte da energia da onda incidente será transmitida para o próximo meio, enquanto a parte remanescente será refletida. Uma onda de compressão é somente transmitida entre meios, ainda na forma de onda de compressão, se esta incidir de forma normal à superfície (HELLIER, 2001). Caso o ângulo de incidência θ entre a direção de propagação da onda e o eixo normal à superfície seja diferente de zero, uma onda de compressão é refletida e refratada como onda de compressão e de cisalhamento, de acordo com a lei de Snell-Descartes (PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018), conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 – (a) Princípio da reflexão; (b) refração de uma onda ultrassônica na superfície entre meios.



Fonte: Payan, Abraham e Garnier (2018), adaptado.

Em termos de amplitude da onda ultrassônica, os coeficientes de reflexão e de transmissão podem ser calculados pelas Equações (9) e (10), respectivamente (CHEEKE, 2012; PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018):

$$R_p = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad (9)$$

$$T_p = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (10)$$

Supondo uma onda ultrassônica incidindo sobre o concreto com o transdutor simplesmente apoiado sobre a superfície do material (sem o uso de acoplante), o valor absoluto do coeficiente de reflexão seria aproximadamente 1,0, o que resultaria em uma reflexão quase total da onda, sem a passagem de energia para o concreto. Dessa forma, faz-se uso de um material acoplante entre o transdutor e a superfície do concreto, com o objetivo de diminuir a diferença das impedâncias entre os dois meios, permitindo a transmissão das vibrações (ANDREUCCI, 2018).

2.3 ENSAIO DE ULTRASSOM

Atualmente, os métodos ultrassônicos mais utilizados no monitoramento e na inspeção de elementos de concreto são os lineares, baseados na análise da propagação de onda coerente, como a VPU. No entanto, a chegada tardia de ondas em um sinal ultrassônico difuso carrega informações ricas sobre o meio de propagação (SCHURR et al., 2011), fazendo-se

necessário o desenvolvimento de técnicas e de métodos ultrassônicos para extrair informações sistemáticas das ondas *codas*.

Embora correlações entre parâmetros de onda (como a VPU e a atenuação) e resistência ou danos distribuídos possam ser estabelecidas, os resultados são sempre qualitativos, baseados, principalmente, em fórmulas empíricas (AGGELIS; SHIOTANI, 2007). Como o concreto é um material altamente heterogêneo, os mecanismos de propagação de onda devem ser estudados com cautela, assim como os fatores que podem influenciar de forma direta e significativamente nos resultados. A seguir, serão discutidos alguns desses aspectos relacionados ao ensaio de ultrassom no concreto.

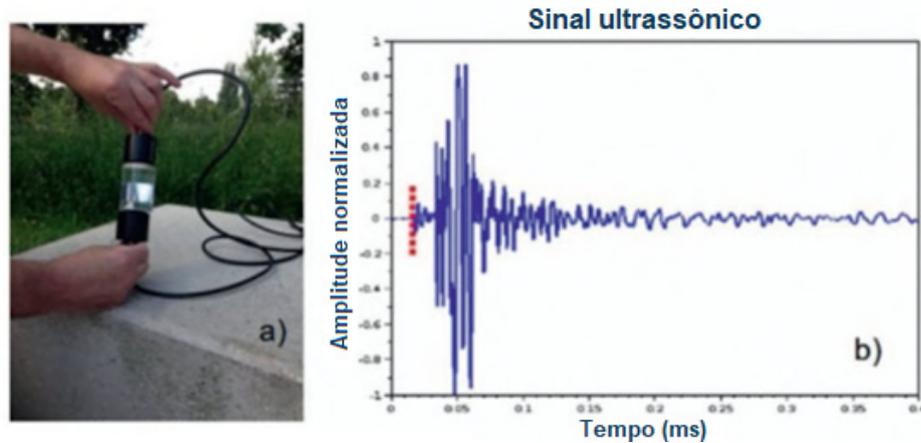
2.3.1 Transmissão e medição de ondas

As ondas ultrassônicas são introduzidas no material por pulsos de voltagem repetitivos gerados eletricamente, com uma certa frequência, e transformados em ondas de energia mecânica por um transdutor transmissor, que deve ser acoplado na superfície do concreto através de um meio adequado. Um transdutor receptor similar também é acoplado no concreto a uma distância conhecida do transmissor, e a energia mecânica é convertida de volta na forma de um pulso elétrico de mesma frequência. Um temporizador eletrônico mede o intervalo de tempo entre a liberação e a recepção do pulso, que é mostrado em um dispositivo de leitura digital (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006).

Tal transmissão de vibração na interface transdutor-concreto é realizada pelo cristal piezolétrico presente nos transdutores através do efeito piezolétrico, definido pela capacidade de transformar energia elétrica alternada em oscilação mecânica, e vice-versa (HELLIER, 2001; ANDREUCCI, 2018). O equipamento do ensaio de ultrassom deve ser capaz de gerar, transmitir para o concreto, receber e amplificar o pulso e medir e mostrar o tempo de transmissão, com precisão de aproximadamente 1% (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006).

Essa precisão pode ser assegurada pela calibração temporal do dispositivo usando um material de referência (Figura 7), além da utilização de um acoplante acústico adequado entre a superfície do concreto e a face do transdutor, sendo geralmente utilizados materiais como vaselina, graxa, mel e/ou géis produzidos para tal finalidade. Segundo Naik, Malhotra e Popovics (2004), deve ser utilizado uma camada fina, mas suficiente, de acoplante e a pressão aplicada nos transdutores deve ser constante de forma a se obter um sinal estável de onda.

Figura 7 – (a) Sistema de medição sendo calibrado utilizando um corpo-de-prova de teste; (b) exemplo de sinal mostrando o ponto de chegada da onda de compressão (marcada em vermelho).



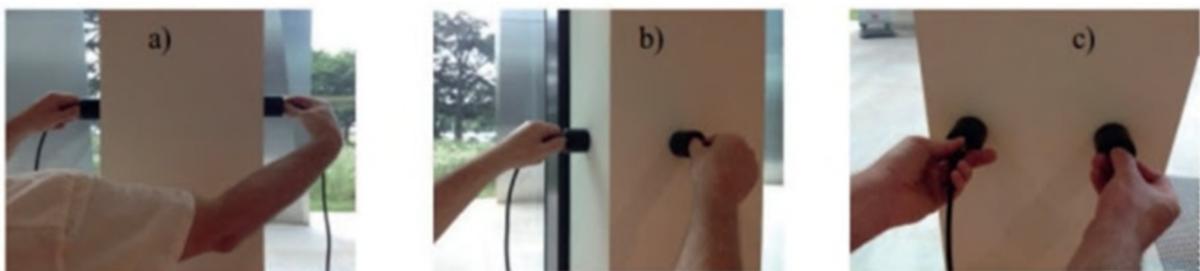
Fonte: Payan, Abraham e Garnier (2018), adaptado.

A escolha do acoplante deve levar em consideração o acabamento superficial (rugosidade), o tipo e a forma da peça, a posição para inspeção, além de apresentar uma impedância compatível com os materiais, sem que ocorram reações químicas entre o acoplante e o material testado (HELLIER, 2001; ANDREUCCI, 2018).

2.3.1.1 Tipos de transmissão

Existem três maneiras de posicionamento dos transdutores: transmissão direta (faces opostas), transmissão semidireta (faces adjacentes) e transmissão indireta (mesma face), conforme representado na Figura 8 e descritos a seguir (IEAE, 2002; BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006).

Figura 8 – Configuração de transmissão (a) direta, (b) semidireta e (c) indireta.



Fonte: Payan, Abraham e Garnier (2018).

Sabendo a distância que separa o transdutor transmissor do receptor, a velocidade de propagação é deduzida a partir do tempo de viagem da onda, conforme Equação (5). Sendo assim, o método direto é o mais adequado para a determinação da VPU, visto que o caminho

percorrido é bem definido e pode ser medido com precisão. Outra vantagem é que a máxima energia do pulso de uma onda de compressão é transmitida em ângulo reto com a face do transmissor, proporcionando a recepção de um sinal claro.

No método semidireto, embora a sensibilidade dos resultados seja menor e haja uma maior atenuação do pulso transmitido, é possível obter resultados satisfatórios desde que o ângulo entre os transdutores e a distância entre eles não sejam muito grandes.

O método indireto é o menos satisfatório dos três, no que diz respeito à chegada da onda direta ou coerente. A amplitude do sinal recebido pode ser menos de 3% do sinal de uma transmissão direta (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006), uma vez que dependerá do espalhamento do pulso devido a descontinuidades e, por isso, está altamente sujeito à erros na determinação da velocidade do pulso direto.

3 DIFUSÃO DA ENERGIA DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

Como visto anteriormente, um campo de onda ultrassônica se propagando em um meio heterogêneo é a soma de um campo coerente balístico, isto é, que se desenvolve de forma direta através do caminho mais rápido entre os transdutores ultrassônicos, e um campo incoerente difuso. O campo difuso é fortemente disperso pelo meio – sendo espacialmente e temporalmente incoerente com relação à fonte emissora – e sua fase é, aproximadamente, aleatória (BECKER; JACOBS; QU, 2003).

A grande atenuação de ondas ultrassônicas no concreto limita o intervalo efetivo de frequências, no qual as ondas são coerentemente propagadas, para frequências abaixo de 100 kHz (ANUGONDA; WIEHN; TURNER, 2001), nas quais o comprimento de onda associado é de alguns centímetros. No concreto, esse comprimento de onda é muito grande para ser significativamente influenciado por microfissuras e outros danos de pequena escala. Diversos tipos de danos críticos em materiais cimentícios, como fissuras, podem estar distribuídos através do material em escalas relativamente pequenas, de alguns milímetros ou menos (BECKER; JACOBS; QU, 2003).

Para ser representativo da microestrutura do material, idealmente essas medições requerem comprimentos de onda ultrassônica da ordem dos danos a serem avaliados. A implicação disso é que frequências de algumas centenas de kHz são necessárias para obter uma sensibilidade considerável. Devido à grande heterogeneidade do concreto, as ondas ultrassônicas de alta frequência são conduzidas primariamente por um processo que se aproxima da difusão e um campo difuso, ou incoerente, é gerado (ANUGONDA; WIEHN; TURNER, 2001). Nesses casos, embora parâmetros de onda como a velocidade e a atenuação possam ser medidos (como é feito no caso dos ensaios utilizando a onda coerente), eles possuem pouco significado prático e não caracterizam a microestrutura do material (WEAVER; SACHSE, 1995; WEAVER, 1998).

A VPU é relativamente insensível a detalhes da microestrutura, pois depende do caminho de onda assumido e de uma interação entre o pulso e a fissura nesse caminho específico (RAMAMOORTHY; KANE; TURNER, 2004). A atenuação, embora forneça uma melhor visão dos detalhes da microestrutura em casos com grande dispersão devido a heterogeneidades microestruturais, diversas vezes é difícil obter medidas inequívocas da atenuação e da separação clara entre os efeitos da dispersão e da absorção dentro da atenuação de uma onda ultrassônica (WEAVER, 1998). Além disso, experimentos usando o campo

coerente tem muitas restrições que os fazem abaixo do ideal para uso fora do laboratório. Por exemplo, o ideal seria ter acesso a dois lados opostos do elemento em análise para que o modo de transmissão direto seja aplicado, o que não pode ser atendido na maioria das estruturas.

Devido a essas e outras dificuldades, nota-se a necessidade de caracterizar a microestrutura a partir da energia incoerente e singularmente dispersa de um feixe sonoro no regime estocástico. Com efeito, nessa condição, o campo de deslocamento de uma onda elástica possui caráter aleatório (com média zero) e sem coerência com sua fase original, e as variáveis de campo se tornam também aleatórias após múltiplas dispersões – o que caracteriza um processo estocástico que pode ser descrito pela aproximação à equação da difusão (PAGE et al., 1995). Dessa forma, utiliza-se uma abordagem em termos de energia média da onda, que continua sendo um parâmetro significativo (WEAVER; SACHSE, 1995).

3.1 MÉTODO DA DIFUSÃO ULTRASSÔNICA

A difusão ultrassônica em um corpo pode ser descrita por uma equação diferencial parcial (EDP) parabólica de segunda ordem que descreve a evolução no tempo da densidade espectral de energia (energia por frequência, por volume) de um campo de ondas ultrassônicas, após este ter sido fortemente disperso (WEAVER, 1998). Essa equação é conhecida como Equação da Difusão e prediz a densidade espectral de energia ultrassônica em um senso médio, sendo similar à Equação de Transferência de Calor, mas com um termo adicional de dissipação (BECKER; JACOBS; QU, 2003; DEROO et al., 2010).

Em sua revisão bibliográfica, Martins (2018) mostrou que a equação de difusão apresentada é apenas uma aproximação do comportamento de um campo de onda fortemente disperso, não sendo uma solução exata. Isso se deve, principalmente, aos princípios de causalidade (limitação da velocidade de transferência de informações de uma onda) e de fase de uma onda, princípios considerados básicos e pertinentes na propagação de ondas de tensão em meios sólidos.

Para que a aproximação pela difusão da energia ultrassônica possa ser aplicada, algumas suposições devem ser feitas. Primeiramente, assume-se que o corpo de aplicação é isotrópico, dessa forma, a energia será dispersa da mesma maneira para todas as regiões. Além disso, a teoria de difusão é baseada na dispersão elástico-linear, na qual não há perda de energia durante a dispersão. Outro ponto importante é considerar que sejam válidas as

condições de contorno de Newmann (fluxo nulo através dos contornos); essa é uma boa aproximação, uma vez que a grande diferença de impedância entre o concreto e o ar resultará em uma perda mínima de energia por essa interface. Por fim, considera-se que os agentes dispersores estão distribuídos aleatoriamente no meio, configurando uma situação estatisticamente independente de múltipla dispersão (ANUGONDA; WIEHN; TURNER, 2001; BECKER; JACOBS; QU, 2003; RAMAMOORTHY; KANE; TURNER, 2004).

Assim, no limite de múltiplos eventos de dispersão em um meio altamente heterogêneo, a densidade de energia de um campo ultrassônico difuso, em um corpo elástico-linear β , se desenvolve de acordo com a Equação de Difusão descrita por Weaver e Sachse (1995) e Weaver (1998) e mostrada na Equação (11):

$$\frac{\partial \langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle}{\partial t} - D \nabla^2 \langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle + \sigma \langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle = P(\mathbf{r}, t, f), \forall \mathbf{r} \in \beta, \quad (11)$$

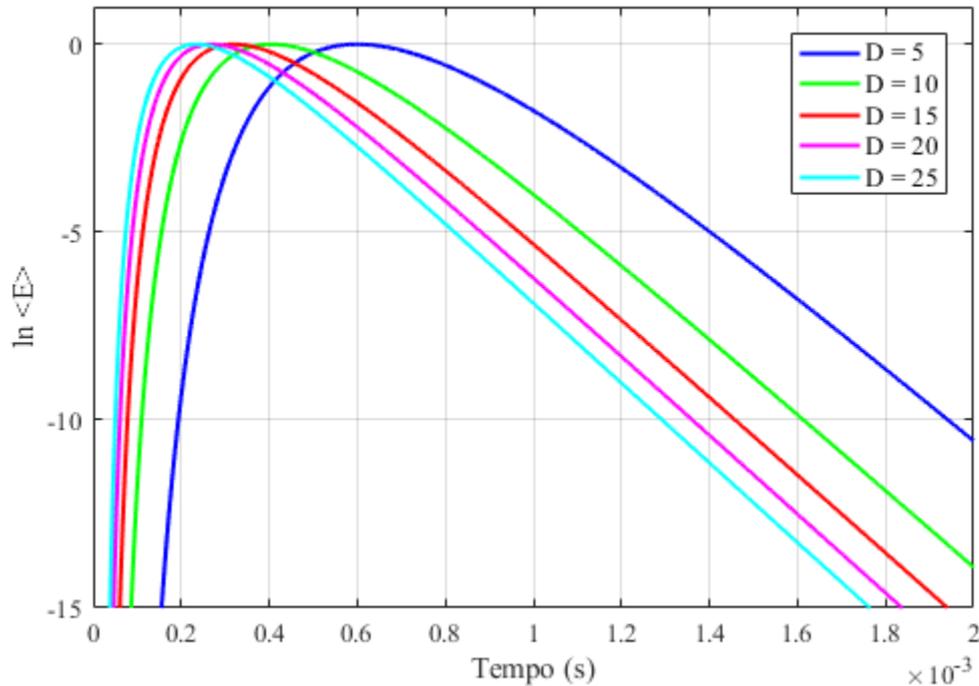
onde $\langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle$ é a densidade espectral de energia por unidade de volume (em um tempo t e em uma frequência f), em um ponto do domínio espacial β especificado pelo vetor posição $\mathbf{r} = r(x, y, z)$; $P(\mathbf{r}, t, f)$ é a densidade espectral de energia da fonte; e D e σ são a difusividade e a taxa de dissipação, respectivamente – ambos dependentes da frequência. O operador $\langle \cdot \rangle$ representa o “valor esperado” em relação às diferentes configurações possíveis; e ∇^2 é o operador de Laplace, definido na Equação (12):

$$\begin{aligned} \nabla^2 \langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle &= \nabla^2 \langle E(x, y, z, t, f) \rangle \\ &= \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \langle E(x, y, z, t, f) \rangle, \forall \mathbf{r} \in \beta \end{aligned} \quad (12)$$

A difusividade ultrassônica (D), com unidade de $[\text{m}^2/\text{s}]$, é característica da microestrutura (WEAVER, 1998) e descreve o quão rápido a intensidade ultrassônica é transferida no material (PLANÈS; LAROSE, 2013). Assim, um valor mais alto de D significa uma maior difusão da energia através do material; dessa forma, espera-se que uma maior dispersão devido a danos presentes no concreto atrase a difusão, o que resultaria em valores mais baixos de difusividade (DEROO et al., 2010; FRÖJD; ULRIKSEN, 2017). Este parâmetro depende do tamanho, da geometria e da concentração dos agregados, assim como do contraste de densidade e da impedância entre estes e a pasta de cimento (QUIVIGER et al.,

2012; PLANÈS; LAROSE, 2013). Na Figura 9 está mostrado o comportamento da densidade de energia de um campo ultrassônico difuso para diversos valores de difusividade (em m^2/s), fixando os demais parâmetros da equação de difusão ($\sigma = 10 \text{ ms}^{-1}$, $P_0 = 1 \text{ V}^2/\text{Hz}$, $r = 30 \text{ cm}$)

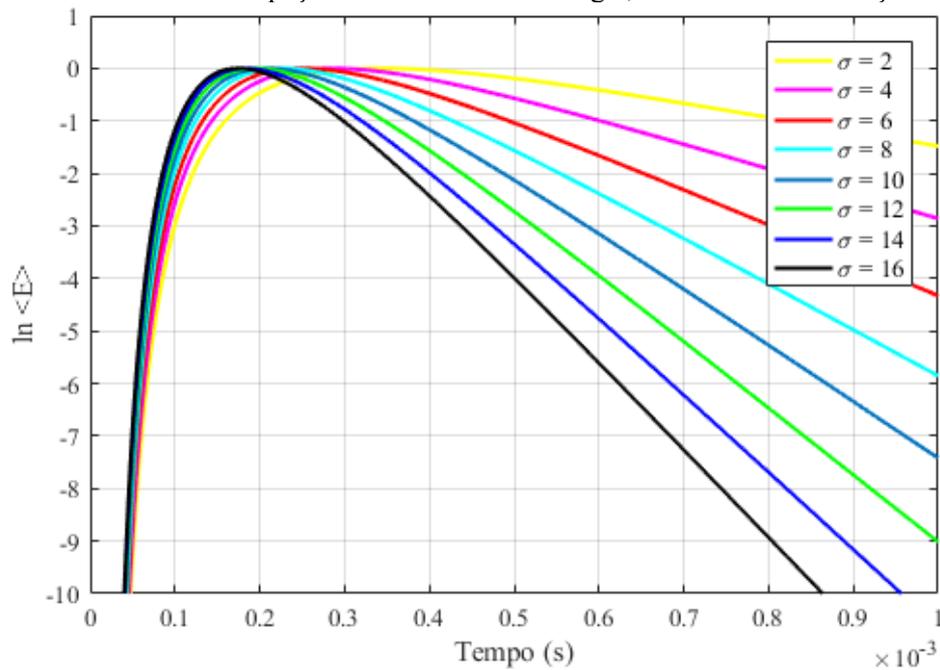
Figura 9 – Influência da difusividade na densidade de energia, considerando a solução 3D infinita.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Já o parâmetro de dissipação (σ), com unidade de $[\text{ms}^{-1}]$, está relacionado com mecanismos lineares de perda de energia – por exemplo, atrito interno e movimento de deslocamento (WEAVER, 1998) – e caracteriza propriedades viscoelásticas do material, que, no caso do concreto, estão, essencialmente, relacionadas com características da pasta de cimento, como o tipo de cimento, a relação água/cimento, o tempo de cura, dentre outros (ANUGONDA; WIEHN; TURNER, 2001). É importante notar que, como a dispersão é um processo conservador de energia, ela não influencia na dissipação (DEROO et al., 2010). A Figura 10 representa o comportamento da densidade de energia de um campo ultrassônico difuso para diversos valores do coeficiente de dissipação (em ms^{-1}), fixando os demais parâmetros da equação de difusão ($D = 30 \text{ m}^2/\text{s}$, $P_0 = 1 \text{ V}^2/\text{Hz}$ e $r = 30 \text{ cm}$).

Figura 10 – Influência da dissipação na densidade de energia, considerando a solução 3D infinita.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Modelos de propagação de onda que incluem o processo de dispersão se baseiam em informações estatísticas da microestrutura. Sendo assim, a equação da difusão descreve a probabilidade de um campo de onda estar presente em uma dada posição, após um dado tempo de propagação (PLANÈS; LAROSE, 2013). Uma das vantagens do método é sua capacidade de distinção entre os processos de dispersão (descrito pela difusividade) e de absorção (representado pela taxa de dissipação), partes da atenuação intrínseca.

3.1.1 Soluções analíticas da Equação da Difusão

Para que a Equação (11) tenha soluções analíticas, é necessário que sejam definidas as condições de contorno. Primeiramente, considera-se que a energia espectral ultrassônica seja nula no momento inicial, $t = 0$. Assim:

$$\langle E(\mathbf{r}, 0, f) \rangle = \langle E(x, y, z, 0, f) \rangle = 0, \quad \forall \mathbf{r} \in \beta. \quad (13)$$

A segunda condição de contorno está relacionada com a consideração inicial de que não há fluxo de energia nos contornos do corpo β , ou seja, o gradiente de energia $\partial\beta$ nos contornos do corpo deve ser igual a zero. Essa condição, conhecida como condição de Newmann, pode ser escrita matematicamente pela Equação (14):

$$\begin{aligned}\nabla\langle E(\mathbf{r}, t, f)\rangle &= \nabla\langle E(x, y, z, t, f)\rangle \\ &= \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}\right)\langle E(x, y, z, t, f)\rangle = 0, \forall \mathbf{r} \in \partial\beta\end{aligned}\quad (14)$$

Outra condição que deve ser avaliada é a condição de forçamento da excitação externa da densidade espectral de energia da fonte, $P(\mathbf{r}, t)$, dependente da frequência. Essa condição diz que, tendo em vista que a fonte ultrassônica é pontual e de curta duração, a excitação externa pode ser aproximada por um impulso concentrado na coordenada de origem (WEAVER; SACHSE, 1995), conforme definição mostrada na Equação (15):

$$\begin{aligned}P(\mathbf{r}, t) &= P(x, y, z, t) = P_0\delta(t)\delta^3(\mathbf{r}) \\ &= P_0\delta(t-t_0)\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)\delta(z-z_0),\end{aligned}\quad (15)$$

onde P_0 é um fator relacionado com a energia de entrada, ao acoplamento do transdutor e outros aspectos pertinentes à medição, com unidade de $[V^2/Hz]$; x_0, y_0 e z_0 são as coordenadas da fonte do impulso e $\delta(x)$ é a função Delta de Dirac.

Satisfeitas tais condições, quando o domínio β é geometricamente simples, é possível obter soluções analíticas para a equação da difusão. Anugonda, Wiehn e Turner (2001), dentro de algumas considerações propostas, abordaram o problema por uma solução analítica unidimensional (1D), em função somente da coordenada axial x e do tempo t , conforme Equação (16), onde o escalar r representa a distância entre o transdutor emissor e o receptor.

$$\langle E(x, t)\rangle = \frac{P_0}{2\sqrt{D\pi t}} e^{-r^2/(4Dt)} e^{-\sigma t}\quad (16)$$

Becker, Jacobs e Qu (2003) e Ramamoorthy, Kane e Turner (2004) propuseram, respectivamente, soluções analíticas bidimensionais (2D) considerando o domínio de placas infinitas e finitas, em coordenadas retangulares (x, y) . Dentro das considerações avaliadas pelos autores, o modelo relacionado com placas infinitas pode ser descrito pela solução apresentada na Equação (17), que adota como origem do sistema a posição do transdutor transmissor e x e y representam a posição do receptor.

$$\langle E(x, y, t) \rangle = \frac{P_0}{4D\pi t} e^{-(x^2+y^2)/(4Dt)} e^{-\sigma t} \quad (17)$$

A solução finita pode ser descrita pela Equação (18):

$$\begin{aligned} \langle E(x, y, t) \rangle = P_0 e^{-\sigma t} \{ & 1 + [g(x, x_0; a) + g(y, y_0; b)] \\ & + [g(x, x_0; a)g(y, y_0; b)] \}, \quad \forall (x, y) \in \beta' \end{aligned} \quad (18)$$

onde a e b são as dimensões da placa; x_0, y_0 e z_0 representam a posição do emissor e x, y e z a posição do receptor. A função $g(X, X_0, A)$ é definida pela Equação (19),

$$g(X, X_0; A) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi X}{A}\right) \cos\left(\frac{n\pi X_0}{A}\right) e^{-D(n\pi/A)^2 t}. \quad (19)$$

Por fim, para um domínio tridimensional (3D), Deroo et al. (2010) propuseram duas soluções: uma considerando um bloco tridimensional infinito e outra considerando que este bloco possui dimensões finitas a, b e c . A solução para o domínio infinito está mostrada na Equação (20), que considera como origem do sistema a posição do transdutor transmissor, e que x, y e z representam a posição do receptor.

$$\langle E(x, y, z, t) \rangle = \frac{P_0}{8(D\pi t)^{3/2}} e^{-(x^2+y^2+z^2)/(4Dt)} e^{-\sigma t}. \quad (20)$$

A solução no domínio finito considera a posição do emissor na coordenada (x_0, y_0, z_0) e do receptor na coordenada (x, y, z) , e é dada pela Equação (21), onde $g(X, X_0, A)$ está definido pela Equação (19).

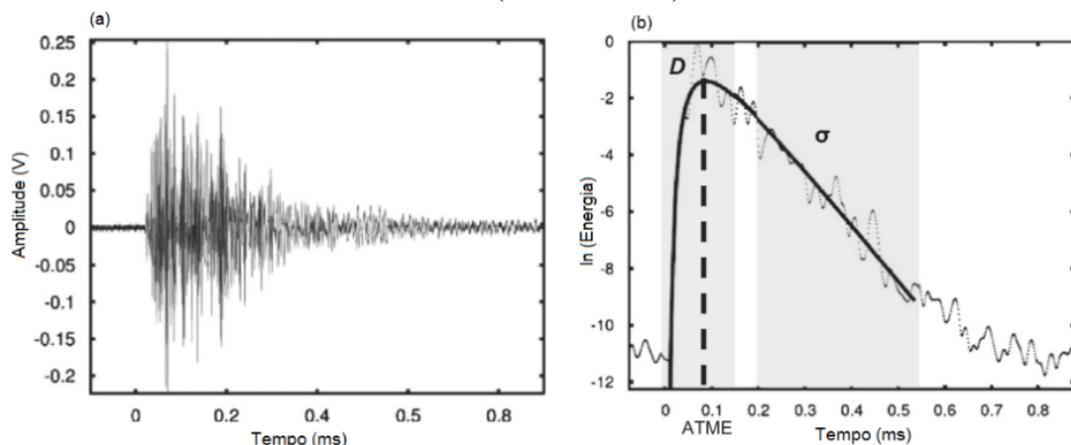
$$\begin{aligned} \langle E(x, y, z, t) \rangle = P_0 e^{-\sigma t} \{ & 1 + [g(x, x_0; a)g(y, y_0; b)g(z, z_0; c)] \\ & + [g(x, x_0; a) + g(y, y_0; b) + g(z, z_0; c)] \\ & + [g(x, x_0; a)g(y, y_0; b) \\ & + g(x, x_0; a)g(z, z_0; c) \\ & + g(y, y_0; b)g(z, z_0; c)] \}, \quad \forall (x, y, z) \in \beta \end{aligned} \quad (21)$$

3.1.2 Processamento do sinal ultrassônico

O procedimento de processamento do sinal para obter a densidade da energia espectral a partir de um sinal medido no domínio do tempo é feito por meio de uma análise tempo-frequência e do ajuste entre as soluções experimentais e analíticas, obtendo, assim, os parâmetros difusos: difusividade, dissipação, ATME e P_0 . Esse procedimento foi repetido e descrito por diversos autores (DEROO, 2009; QUIVIGER, 2012; IN, 2013) e será apresentado de uma forma simplificada seguir.

Primeiramente, um sinal obtido no domínio do tempo (por exemplo, o sinal mostrado na Figura 11a) é arbitrariamente dividido em janelas de tempo de largura Δt , centradas em um tempo t_c e com uma superposição específica entre janelas. O formato de onda de cada janela de tempo é multiplicado por uma janela de Hann, com o objetivo de suavizar as bordas e reduzir ressaltos laterais artificiais do sinal, e, em seguida, realiza-se a Transformada Discreta de Fourier no tempo em cada janela separada. Ainda, para cada janela de tempo, o espectro de potência resultante é elevado ao quadrado e integrado em relação à frequência de largura arbitrária Δf , centrada na frequência f_c , para a determinação da densidade espectral de energia.

Figura 11 – (a) Sinal de uma onda ultrassônica difusa no domínio do tempo; (b) representação da densidade espectral de energia em função do tempo (linha pontilhada) e aproximação por uma solução analítica (linha contínua).



Fonte: Quiviger et al. (2012), adaptado.

A densidade espectral de energia experimental resultante, $\langle \hat{E}(\mathbf{r}, t, f) \rangle$, não é precisamente a densidade espectral de energia ultrassônica, mas se difere desta por um fator relacionado à aleatoriedade do meio, à sensibilidade do transdutor, a efeitos de acoplamento e a parâmetros de aproximação na análise tempo-frequência apresentada (WEAVER, 1998).

Esse fator é desconhecido, mas pode ser considerado constante (WEAVER; SACHSE, 1995). Dessa forma, $\langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle$ é a média de valores de $\langle \hat{E}(\mathbf{r}, t, f) \rangle$ obtidos a partir de diferentes configurações. Se as configurações da difusão forem estatisticamente independentes e um número considerável de medidas forem feitas, essa média converge efetivamente para $\langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle$ (BECKER; JACOBS; QU, 2003).

Essas flutuações da densidade espectral de energia experimental podem ser calculadas conforme proposto por Weaver e Sachse (1995) e Weaver (1998), seguindo a estatística de Gauss e assumindo um regime praticamente estacionário em cada janela de tempo. Assim, a variância pode ser estimada em função de Δt e Δf , conforme apresentado na Equação (22):

$$\sigma^2 = \frac{1}{\Delta t \Delta f} . \quad (22)$$

Essa equação foi inicialmente proposta para janelas de tempo retangulares (WEAVER; SACHSE, 1995). Para os casos em que são aplicados a janela de Hann (que assume pesos menores para os valores fora dos pontos centrais da janela de tempo), Deroo (2009) propõe que seja utilizado um fator de normalização α para considerar essa diferença entre a janela retangular e a de Hann, cujo cálculo pode ser feito pela Equação (23):

$$\alpha = \frac{\sum_0^{N-1} w(n)}{\sum_0^{N-1} r(n)} = \frac{1}{N} \sum_0^{N-1} w(n) , \quad (23)$$

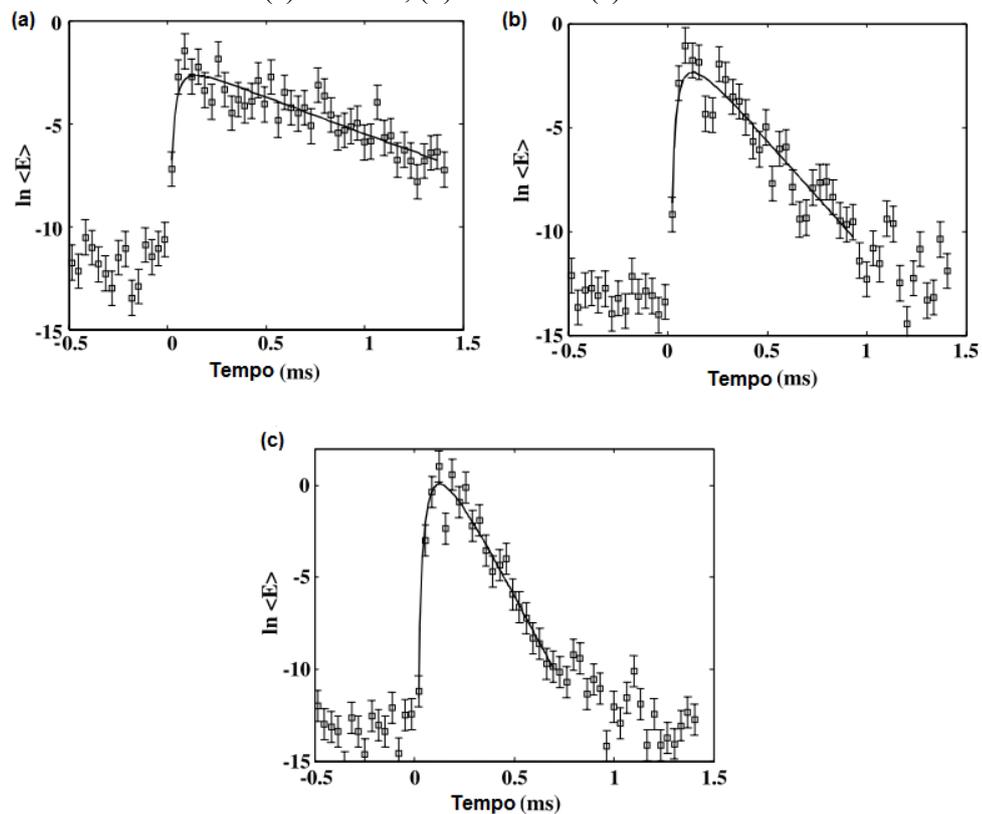
onde N é o número de pontos da janela de tempo, $w(n)$ é a janela de Hann e $r(n)$ é a janela retangular.

Assim, a variância mostrada na Equação (22) é modificada e tem-se que a densidade de energia experimental flutua em torno de sua média por uma parte de α vezes a raiz quadrada do produto de Δt por Δf , como mostrado na Equação (24).

$$\langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle = \langle \hat{E}(\mathbf{r}, t, f) \rangle \pm \frac{1}{\sqrt{\alpha \Delta t \Delta f}} \langle \hat{E}(\mathbf{r}, t, f) \rangle \quad (24)$$

Esse desvio em torno da energia experimental resultante $\langle \hat{E}(r,t,f) \rangle$, que pode apresentar valores acima de 80%, não caracteriza erros, mas flutuações previstas que são causadas pela aleatoriedade do meio. Na Figura 12 estão ilustrados exemplos de resultados experimentais da energia difusa em função do tempo obtidos por Anugonda, Wiehn e Turner (2001), onde as flutuações esperadas são de 84% (representadas pelas barras de erro) e a linha sólida é o ajuste à solução analítica unidimensional da equação da difusão. É possível notar que esses desvios se encaixam aleatoriamente acima e abaixo da curva, o que sugere uma boa qualidade do ajuste.

Figura 12 – Resultado experimental e ajuste à solução analítica para frequência de excitação de (a) 100 kHz, (b) 300 kHz e (c) 500 kHz.



Fonte: Anugonda, Wiehn e Turner (2001), adaptado.

Os parâmetros de difusão ultrassônica são obtidos por meio do ajuste entre as curvas da densidade espectral de energia experimental (determinada por meio da análise tempo-frequência) e da função associada à solução analítica da equação da difusão, em uma plotagem logarítmica, conforme Figura 11b. Esse ajuste entre as curvas experimental e analítica é feito usando funções de regressão. In et al. (2016) utilizaram uma função não-linear (no caso, a função “lsqnonlin” no MATLAB) para ajustar a solução analítica 3D de

domínio finito. Deroo et al. (2010) e Becker, Jacobs e Qu (2003) utilizaram uma regressão linear simples (como o método dos mínimos quadrados) para a solução 3D aplicada a contornos infinitos e para a solução 2D também para contornos infinitos, respectivamente.

O processo de ajuste resulta em três parâmetros que caracterizam completamente o fenômeno difuso: σ , D e P_0 . De forma prática, σ descreve o decaimento exponencial observado nos tempos avançados (ondas mais íngremes correspondem a uma maior dissipação), estando relacionado com o tempo de chegada da máxima energia (QUIVIGER et al., 2012), como pode ser observado na Figura 10. A difusividade predomina na primeira parte do sinal da energia e está relacionada ao tempo de chegada do pico máximo de energia, descrevendo o quão rápido esta é transferida no/atraves do material. Por ser aproximada a partir de um número reduzido de pontos em relação ao sinal completo da energia (como pode ser observado na Figura 11b e na Figura 12), a escolha do ponto de início de ajuste dos dados produz uma variação significativa na determinação do parâmetro D (QUIVIGER et al., 2012). Já o parâmetro P_0 é um fator que depende da energia inicial depositada pela fonte e só é conhecido com certeza a partir de um processo extenso de calibração (WEAVER, 1998; ANUGONDA; WIEHN; TURNER, 2001), não sendo necessário para a caracterização do material (BECKER; JACOBS; QU, 2003).

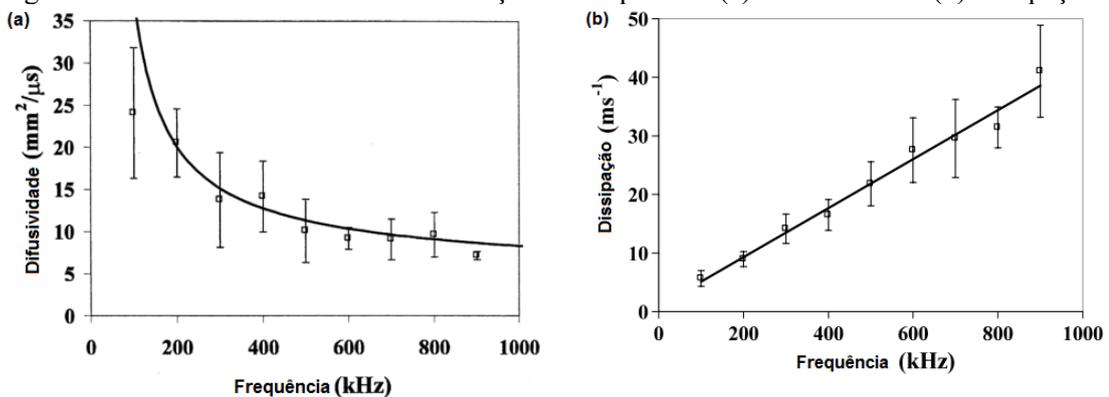
Outro parâmetro que pode ser inferido desse processo, sendo enunciado pela primeira vez por Ramamoorthy, Kane e Turner (2004), é o tempo de chegada da máxima energia (ATME, do inglês *Arrival Time of the Maximum Energy*), também indicado na Figura 11b. O ATME é definido pelo tempo de chegada do pico de amplitude máxima da energia difusa e pode ser usado para inferir a profundidade de fissuras superficiais. Esse tempo de chegada do pico diminui com valores de dissipação mais altos (ver Figura 10) e, além de ser dependente dos parâmetros de σ e D , depende também da distância entre o transdutor emissor e o receptor (QUIVIGER et al., 2012).

A escala de tempo no qual a energia sofre influência da dispersão e pode ser aproximada pela difusão é de alguns milissegundos – intervalo maior do que o tempo de propagação da onda coerente através do corpo de prova (alguns microssegundos). Entretanto, no processo de ajuste, somente um pequeno intervalo de tempo é considerado, no qual os dados do espectro de energia estão acima do nível de ruído. Os pontos escolhidos para início e final dos dados influenciam sensitivamente os parâmetros de difusão. Na análise feita por Quiviger et al. (2012), foi considerado o intervalo com nível de energia sistematicamente acima do limiar definido pelo nível de ruído médio somado a três vezes o desvio padrão, estatisticamente correspondendo a mais de 99% da população.

3.2 APLICAÇÕES DO MÉTODO DE ULTRASSOM DIFUSO

A primeira pesquisa a aplicar a técnica de ultrassom difuso no concreto foi desenvolvida por Anugonda, Wiehn e Turner (2001) e teve como objetivo determinar os parâmetros de difusão para frequências no intervalo de 100 a 900 kHz e comparar com valores teóricos de um modelo de ondas estocásticas e elásticas. Uma comparação entre o modelo teórico e os dados experimentais estão mostrados na Figura 13.

Figura 13 – Parâmetros de difusão em função da frequência: (a) difusividade e (b) dissipação.



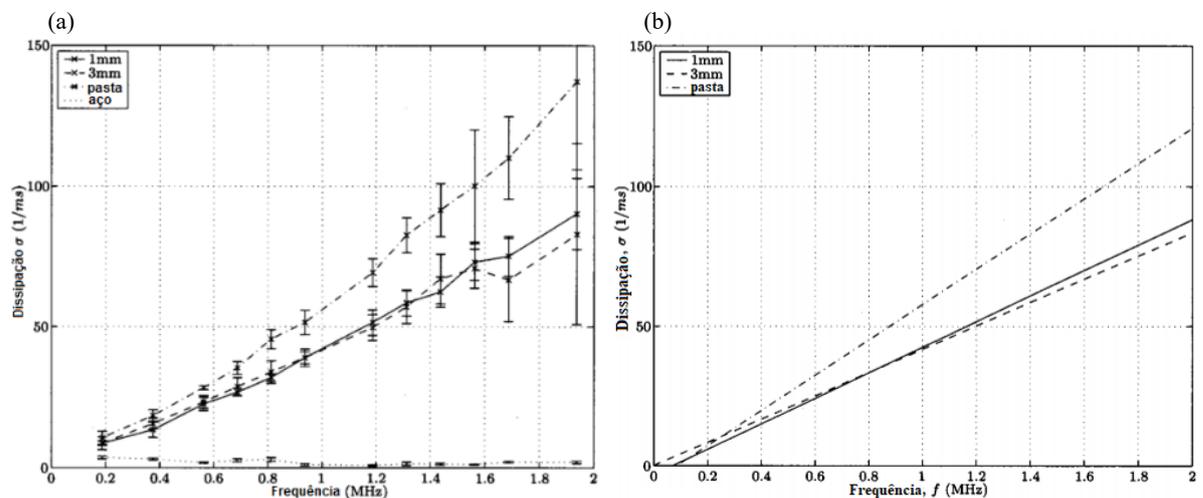
Fonte: Anugonda, Wiehn e Turner (2001), adaptado.

As barras de erro mostradas correspondem a flutuações das difusividades e/ou dissipação medidas em diferentes posições e diferentes corpos de prova. O ajuste dos dados experimentais às curvas do modelo teórico foi considerado razoavelmente bom para o intervalo de frequência examinado, uma vez que estes estão em conformidade. No caso da dissipação (Figura 13b), a curva ajustada mostrada é uma regressão linear dos dados.

Embora Anugonda, Wiehn e Turner (2001) tenham mostrado resultados satisfatórios, abrindo muitas possibilidades em termos de caracterização não destrutiva de danos microestruturais no concreto, eles utilizaram somente um tipo de corpo de prova de concreto e não investigaram uma possível influência do tamanho e da distribuição dos agregados nos parâmetros de difusão obtidos. Nesse sentido, Becker, Jacobs e Qu (2003) examinaram o efeito da microestrutura do concreto no campo ultrassônico difuso, comparando parâmetros medidos em corpos de prova de pasta de cimento com inclusão de variados tamanhos e distribuições de “agregados” de vidro. Na Figura 14 é comparada a dissipação recuperada, σ , em função da frequência e do tipo de corpo de prova. Esses resultados comprovaram que a dissipação possui uma relação linear com a frequência; um fenômeno que é particularmente

importante, uma vez que o comportamento da atenuação devido ao amortecimento viscoelástico do material também é linearmente dependente da frequência (ROSE, 1999, *apud* BECKER; JACOBS; QU, 2003). A partir da regressão linear da variação de σ na frequência, mostrada na Figura 14b, pode-se ainda concluir que os valores quase iguais da dissipação nos corpos de prova com agregados de 1 e 3 mm de diâmetro confirmam que a dissipação de energia em materiais cimentícios ocorre somente devido à viscoelasticidade da pasta de cimento e não devido à zona interfacial.

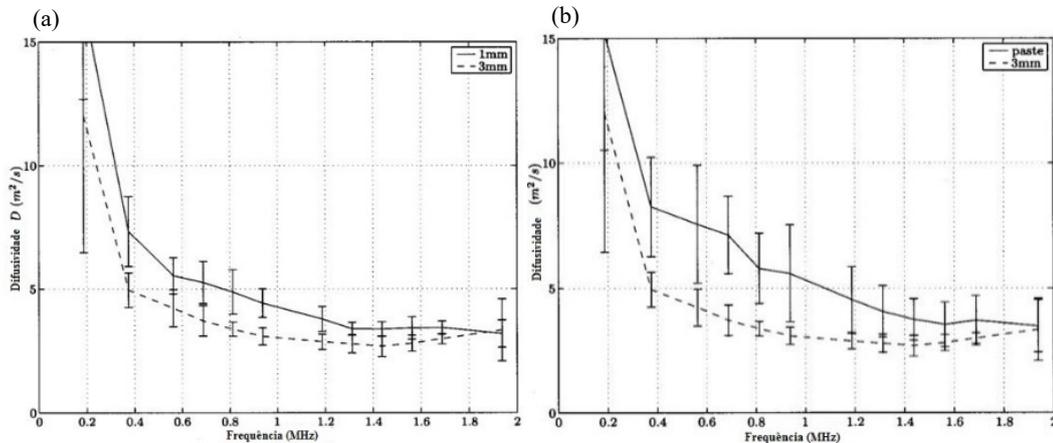
Figura 14 – Comparação da dissipação (a) calculada a partir de amostras com agregados (de 1 e 3 mm), sem agregados e de aço, e (b) obtidas a partir da regressão linear para amostras sem agregados e com agregados (de 1 e 3 mm).



Fonte: Becker, Jacobs e Qu (2003), adaptado.

Em relação à difusividade, Becker, Jacobs e Qu (2003) mostraram que é possível distinguir dois tamanhos de agregados a partir desse parâmetro, como mostrado na Figura 15, embora não seja possível uma distinção entre frações de volumes diferentes de agregados por meio da metodologia por eles proposta. Por essa razão, a difusividade apresentou ter uma capacidade limitada para resolver variações na microestrutura, sendo altamente dependente dos parâmetros selecionados para a análise tempo-frequência.

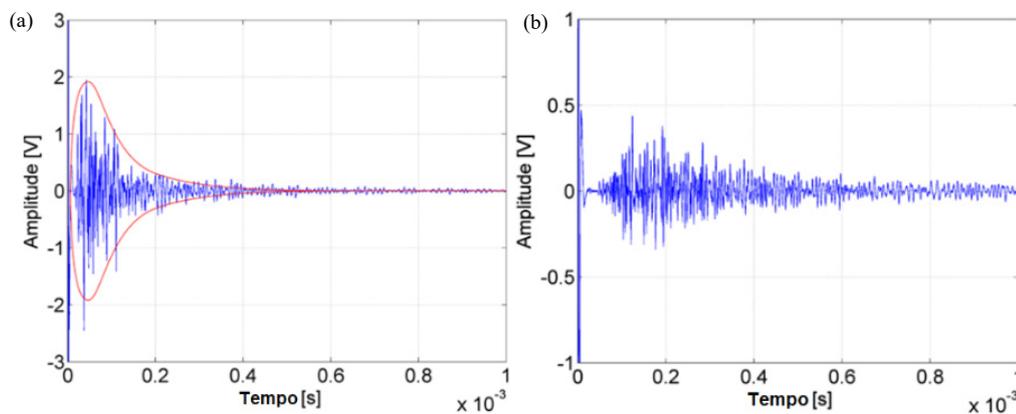
Figura 15 – Comparação da difusividade média entre amostrar (a) com agregados de 1 e 3 mm e (b) com agregados de 3 mm e sem agregados.



Fonte: Becker, Jacobs e Qu (2003), adaptado.

Um avanço importante na aplicação do método de ultrassom difuso no concreto foi dado Ramamoorthy, Kane e Turner (2004), que apresentaram uma metodologia para a determinação da profundidade de fissuras superficiais em corpos de prova de concreto por meio do ultrassom difuso, utilizando frequências no intervalo entre 400 e 600 kHz. A metodologia apresentada se baseou na definição do ATME, relacionando a profundidade de uma fissura com o tempo de defasagem, definido como a diferença entre valores de ATME obtidos uma região sã e outra fissurada. Um exemplo dessa defasagem pode ser observado na Figura 16, onde o atraso do tempo de chegada do pico máximo é visível (nesse caso, a diferença de tempo é de aproximadamente 30 μs).

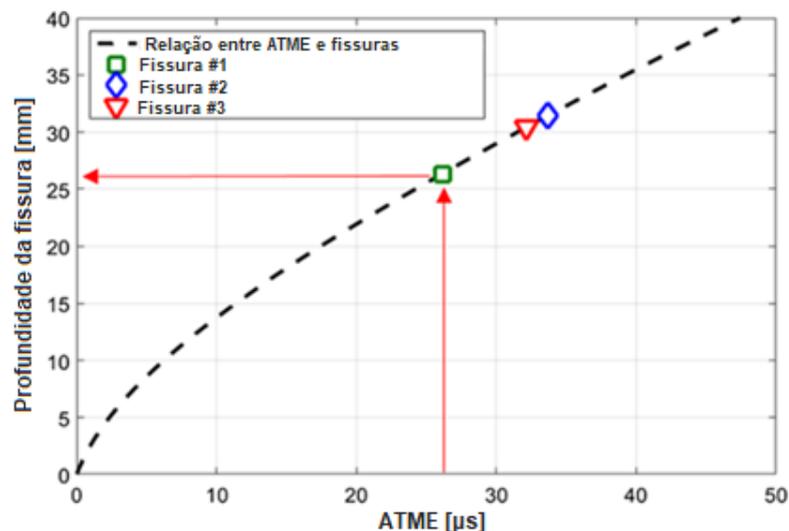
Figura 16 – Sinal de ultrassom difuso típico (a) de uma amostra não fissurada e (b) de uma amostra com fissura de 10,16 cm.



Fonte: Seher et al. (2012), adaptado.

Foi mostrado que a defasagem do ATME de uma região fissurada em relação à não fissurada aumenta com o aumento da profundidade da fissura, que pode ser determinada no concreto em duas etapas. Na primeira, as propriedades da difusão são recuperadas a partir de medições em regiões sãs, longe das bordas e de grandes fissuras; na segunda, usando essas propriedades “sãs”, uma relação entre a defasagem de ATMEs e a profundidade de fissuras pode ser obtida por meio de uma análise numérica. Uma vez que essa relação é estabelecida, a profundidade vertical de uma dada fissura pode ser estimada por meio da curva gerada (por exemplo, a curva mostrada na Figura 17), a partir do ATME obtido experimentalmente nessa região fissurada.

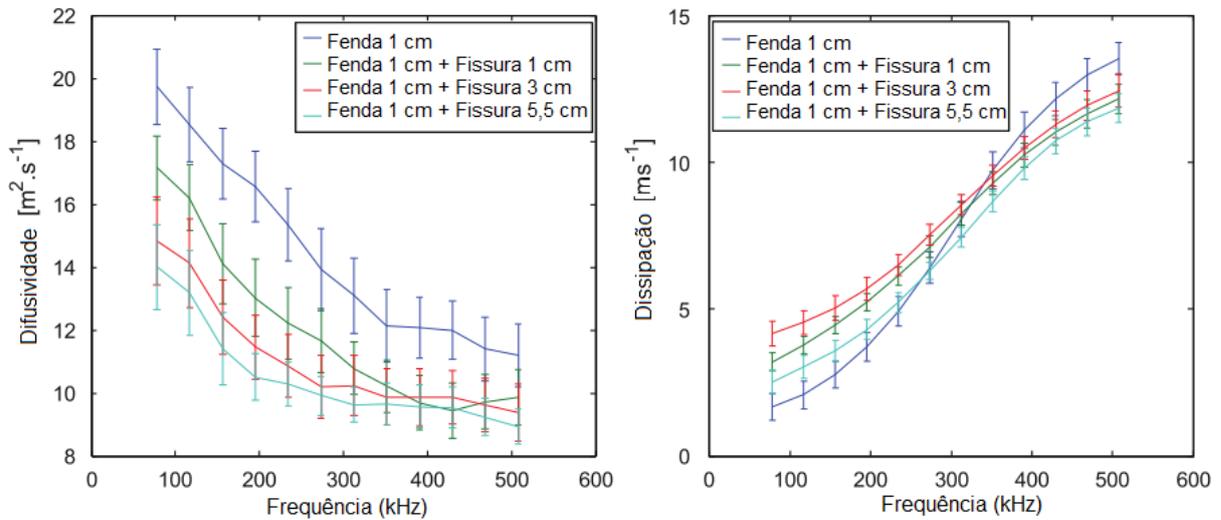
Figura 17 – Defasagem entre ATMEs *versus* profundidade da fissura, para uma distância entre transdutores de 6 cm.



Fonte: In et al. (2016), adaptado.

Uma possível limitação desta aplicação se deve ao fato de que as simulações propostas por Ramamoorthy, Kane e Turner (2004) precisam do conhecimento prévio das propriedades de difusão do concreto sem danos. Tentando reverter essa limitação, Quiviger et al. (2012) estudaram a contribuição de microfissuras reais no fenômeno de difusão, com o objetivo de detectar, localizar e caracterizar microfissuras presentes em revestimentos de concreto. A evolução da difusividade e da dissipação, em função da frequência, foi obtida a partir dos resultados do processamento de sinal e está mostrada na Figura 18.

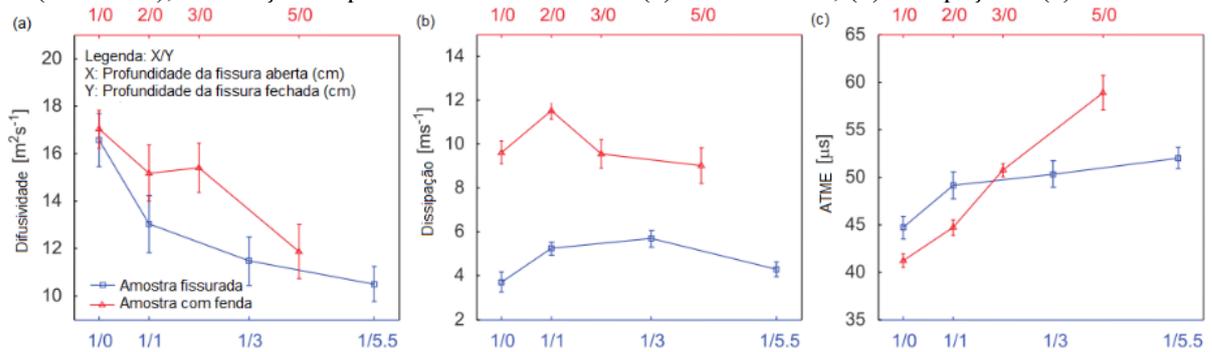
Figura 18 – Variação da (a) difusividade e (b) dissipação em corpos de prova fissurados, em função da frequência.



Fonte: Quiviger et al. (2012), adaptado.

Observa-se que a tendência dos resultados obtidos está de acordo com os valores encontrados por Anugonda, Wiehn e Turner (2001). Os resultados completos obtidos por Quiviger et al. (2012) estão demonstrados na Figura 19, considerando a energia central que apresentou uma maior quantidade de energia transmitida (240-320 kHz)

Figura 19 – Variação dos parâmetros de difusão em amostras fissuradas (azul) e com fendas (vermelho), em função da profundidade da fissura. (a) Difusividade, (b) dissipação e (c) ATME.



Fonte: Quiviger et al. (2012), adaptado.

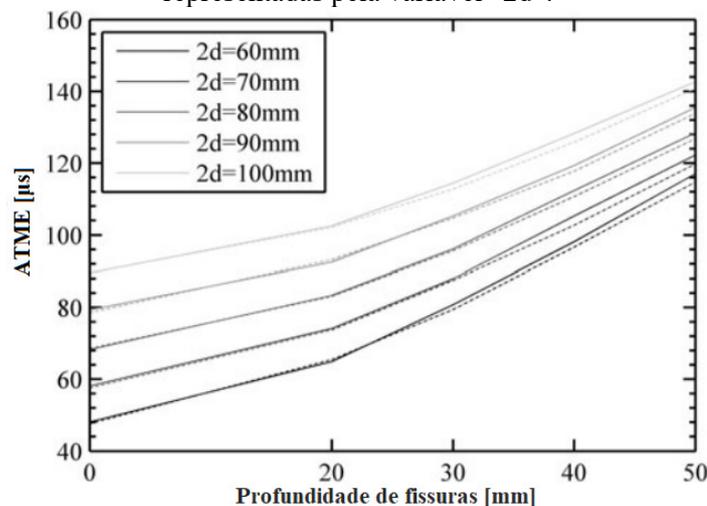
Como esperado, a difusividade tende a diminuir com o aumento da profundidade das fendas, uma vez que estas atrasam o transporte de energia entre os transdutores (Figura 19a). A dissipação, sendo uma propriedade do material, não tem uma variação notável em função do entalhe aberto; a diferença obtida entre a curva azul e a vermelha é justificável, pois as amostras foram feitas com dois concretos diferentes (Figura 19b). O ATME varia de forma

considerável em função da profundidade das fendas (Figura 19c). Os resultados mostraram uma influência da parte fechada da fissura, com regiões em contato parcial que possibilitam a passagem de energia, nos valores da difusividade e do ATME (linhas azuis). Tais análises também mostraram que, uma vez que o ATME é representativo do sinal como um todo, ele é menos influenciável pelo limiar de amostragem definido a partir do nível de ruído e sua associação com incertezas é bem menor do que a difusividade, como é evidenciado pelo tamanho das barras de erro na Figura 19c e na Figura 19a, respectivamente.

Dando continuidade ao estudo de caracterização de fissuras a partir de inferências do método de ultrassom difuso, Seher et al. (2012) realizaram análises numéricas (por meio de um modelo de elementos finitos) e experimentais para determinar a profundidade de fissuras superficiais no concreto. Os parâmetros de difusão foram obtidos a partir de medições feitas em amostras não fissuradas e fissuradas. Em seguida, esses valores foram utilizados nas simulações em um *software* comercial de análise numérica de elementos finitos e as profundidades das fissuras foram determinadas por meio da comparação dos tempos de chegada experimentais e numéricos da energia de ultrassom difuso média – procedimento similar ao desenvolvido por Ramamoorthy, Kane e Turner (2004).

Dentro dos diversos padrões e configurações analisadas pelos autores, foi avaliada a influência de armaduras nos parâmetros de difusão. Na Figura 20 está apresentado o tempo de chegada da energia de pico em função da profundidade de fissuras e da distância entre a fonte e o receptor, representada pela variável “2d”.

Figura 20 – Comparação entre o ATME e a profundidade de fissura, considerando a presença (linha contínua) ou não (linha pontilhada) de armadura, para diferentes distâncias entre transdutores, representadas pela variável “2d”.

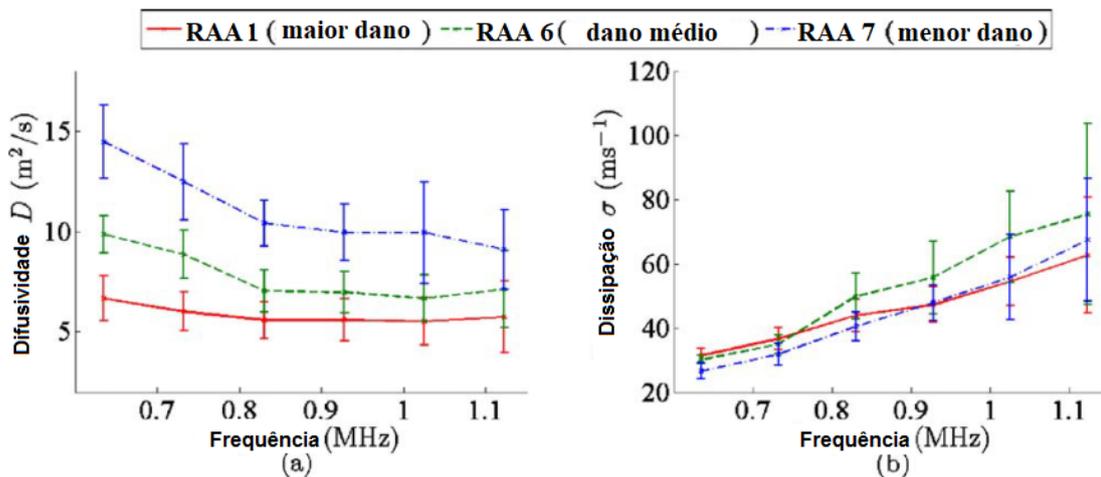


Fonte: Seher et al. (2012), adaptado.

Estes resultados mostram que a influência da armadura no ATME é bastante pequena, pois os respectivos pares de curvas para esses casos estão em concordância. Como esperado, a influência das armaduras aumenta com o aumento da profundidade da fissura. Essa influência pode ser ignorada até que as fissuras atinjam a armadura; nesse momento, o ATME aumentará subitamente, de forma proporcional à distância de propagação de duas vezes o diâmetro da armadura. Este resultado é similar ao caso da fenda parcialmente fechada, no qual a energia ultrassônica difusa se propaga através da pequena parte fechada da fissura e não carrega muita informação sobre os detalhes geométricos do meio de propagação, como mostrado por Quiviger et al. (2012).

Outro passo importante dentro das aplicações do método da difusão ultrassônica foi dado por Deroo et al. (2010), que utilizaram duas soluções diferentes da equação da difusão – um modelo de volume tridimensional infinito que despreza os limites geométricos e um modelo cuboide finito 3D – para avaliar danos de microfissuras no concreto causados pela reação álcali-agregado (RAA) e danos térmicos, relacionando-os aos parâmetros de difusão. Uma primeira conclusão foi obtida considerando os valores de difusividade e dissipação extraído da análise experimental dos corpos de prova com danos devido à RAA, a partir dos dados representados na Figura 21.

Figura 21 – Difusividade e dissipação recuperados de corpos de prova danificados pela, obtidos a partir do modelo infinito 3D.



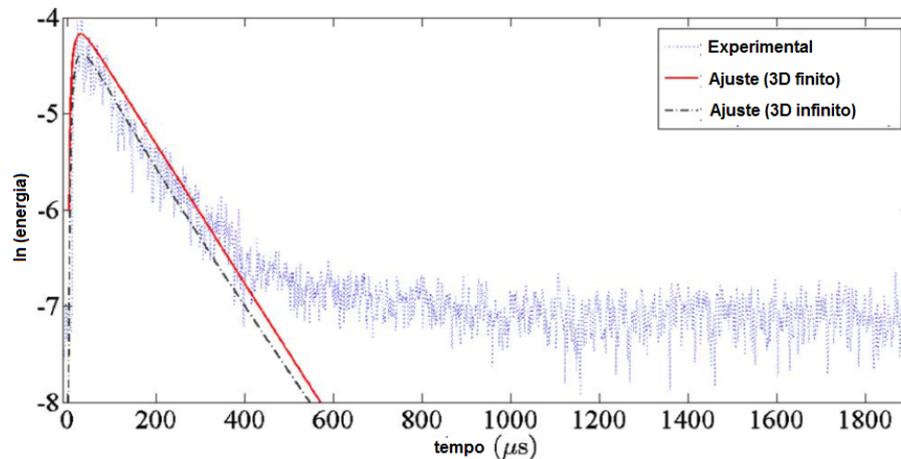
Fonte: Deroo et al. (2010), adaptado.

Como pode ser visto nos gráficos, a difusividade apresenta uma tendência clara, com valores mais baixos em corpos de prova com danos maiores. Por sua vez, a dissipação apresenta valores estatisticamente bem próximos para todos os níveis de dano; o que está de

acordo com o esperado fisicamente, uma vez que σ depende apenas das propriedades do material, que é o mesmo em todas as amostras.

Outra conclusão a partir do trabalho desenvolvido por Deroo et al. (2010) pode ser feita em relação aos modelos adotados. Embora a equação que considera o domínio infinito seja uma aproximação que despreza as dimensões finitas do corpo de prova, ambos os modelos apresentaram tendências qualitativas idênticas, nas quais a difusividade decresce com o aumento do dano, enquanto a dissipação permanece quase sem mudança; tal efeito mostra que a solução finita não torna a aplicação muito mais acurada, como pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Densidade espectral de energia com curvas de ajuste correspondentes aos modelos infinito e finito.



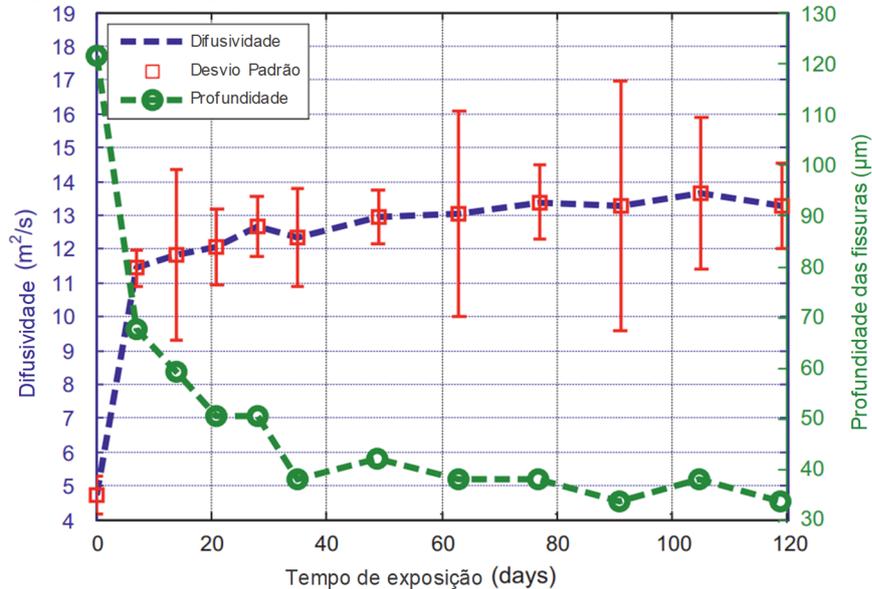
Fonte: Deroo et. al (2010), adaptado.

Dessa forma, o modelo infinito se torna atrativo devido à sua simplicidade, que possibilita a utilização de regressão linear simples no ajuste da curva analítica à experimental, podendo ser utilizado como um primeiro passo para estimar as tendências de difusividade e de dissipação. Além disso, os valores determinados aqui podem servir como uma estimativa inicial para um modelo mais complexo e não linear de ajuste, necessário para a solução finita tridimensional.

Em uma aplicação mais prática do método da difusão ultrassônica, In et al. (2013) acompanharam a progressão da autocicatrização de corpos de prova de concreto utilizando os parâmetros de difusão. Um gráfico comparativo entre o comportamento da difusividade e a profundidade da fissura analisada, em função do tempo de exposição do concreto ao ambiente, é apresentado na Figura 23. Os autores mostraram que a difusividade e o ATME foram sensíveis à auto cicatrização das fissuras e ao comportamento da microestrutura do

material, mostrando a potencialidade de identificação do processo estudado em função do tempo, além de possibilitar uma verificação de que a auto cicatrização de fato ocorreu.

Figura 23 – Comparação da difusividade com a profundidade das fissuras.



Fonte: In et al. (2013), adaptado.

3.2.1 Fatores externos que influenciam nos parâmetros de difusão

Existem diversos fatores que podem influenciar os resultados de ensaios de ultrassom realizados em concreto *in situ* e, conseqüentemente, na ocorrência do processo de difusão, como a temperatura, a umidade, o histórico de tensões, o comprimento do caminho de propagação, o formato e o tamanho do elemento testado, a presença de armaduras e as propriedades do concreto e de seus elementos constituintes (como agregados, cimento, relação água/cimento e idade), entre outros. Alguns desses fatores serão discutidos a seguir.

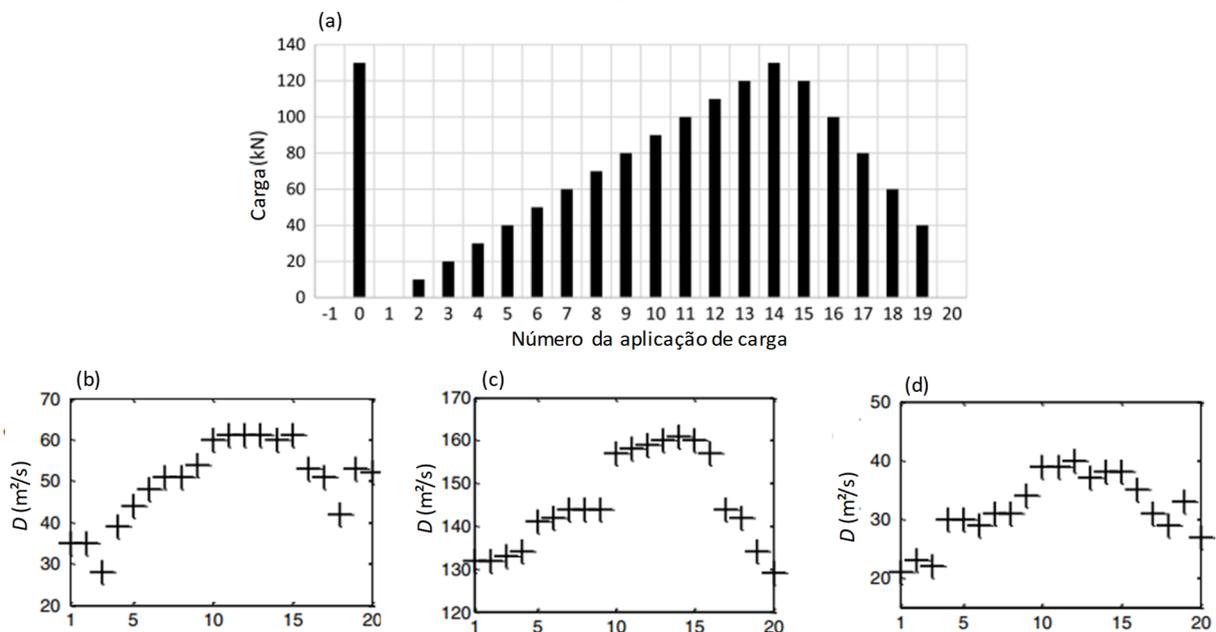
3.2.1.1 Histórico de tensões

Ao contrário do que ocorre em um sólido isotrópico livre de tensões, a VPU não é constante ao passar através de um sólido elástico e não-homogêneo tensionado. Essa variação da velocidade está relacionada com o estado de tensão do material, com a direção de propagação da onda em relação ao plano cristalino do material e com a direção do movimento das partículas no meio, ou seja, do tipo de onda (CARMO et al., 2007). Esse fenômeno é

conhecido como acustoelasticidade, sendo definido como a variação da VPU se propagando em um material elástico tensionado (LILLAMAND et al., 2010).

Estudos publicados recentemente por Jiang et al. (2019) e Zhan, Jiang e Jiang (2019) mostraram a influência da acustoelasticidade nos valores de difusividade. Os autores concluíram que este parâmetro aumenta com o aumento da tensão de compressão gerada pela aplicação do carregamento, conforme apresentado na Figura 24. A figura mostra os passos de carregamento e os valores medidos de difusividade em diferentes posições de leitura, com diferentes distâncias entre transdutores.

Figura 24 – (a) Sequência da aplicação de carga; (b), (c) e (d) valores da difusividade medida em diferentes posições.



Fonte: Jiang et al. (2019)

3.2.1.2 Distância entre transdutores

Em ensaios de ultrassom, quanto maior for a distâncias entre transdutores, mais alto será nível de atenuação do sinal. Isso pode ter uma influência significativa quando se utilizam frequências acima de 200 kHz, como é o caso do método da difusão ultrassônica, que se baseia na porção incoerente do sinal ultrassônico obtido em ensaios de ultrassom com frequências na ordem de centenas de kHz até alguns MHz. No que se refere à aplicação do método da difusão ultrassônica, inicialmente, foi predito que os parâmetros de difusão não eram dependentes da distância entre transdutores (WEAVER; SACHSE, 1995). Mas um estudo recém-publicado concluiu que variações na distância entre transdutores causa

perturbações nos valores medidos de difusividade e de dissipação, sendo que a difusividade é o parâmetro mais afetado (AHN et al., 2019).

3.2.1.3 Armaduras

Um fator significativo que pode influenciar os resultados de um ensaio de ultrassom é a presença de armaduras. No cálculo da velocidade de pulso ultrassônico, essa influência dependerá da presença de armadura na seção ensaiada, do diâmetro e do número de barras e de sua orientação em relação ao caminho de propagação (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006). Na aplicação do método de ultrassom difuso, essa influência ainda não tem sido estudada.

3.2.2 Considerações para aplicação do método de difusão ultrassônica

Baseado em trabalhos já desenvolvidos, alguns fatores apresentaram ter significativa influência para a obtenção de bons resultados. Primeiramente, a escolha da largura da janela de tempo, Δt , e da largura da banda de frequência, Δf , que serão utilizados na análise tempo-frequência deve ser estudada. O desvio padrão da densidade espectral de energia média pode ser reduzido aumentando Δt e/ou Δf , mas isso resultará em uma perda de resolução no tempo ou na frequência - em princípio, essas flutuações também podem ser reduzidas por meio da média espacial de pequenas regiões (WEAVER, 1998).

Valores mais baixos de Δf resultam na recuperação de valores mais exatos para D e σ , uma vez que a integração na frequência é feita em uma região menor. Entretanto, um valor menor de Δf aumenta as flutuações de $\langle \hat{E}(\mathbf{r}, t, f) \rangle$ e, assim, diminui a qualidade do ajuste da aproximação. Em relação à janela de tempo, valores baixos de Δt proporcionam uma melhor resolução no domínio do tempo e um melhor ajuste no pico máximo de energia; por outro lado, há um aumento nas flutuações, visto que os valores discretos de energia são obtidos a partir de janelas de tempo menores, o que diminui a qualidade do ajuste.

Conforme tem sido observado em pesquisas que atualmente estão sendo desenvolvidas no GPEND/UFSC, os dados de entrada Δt e Δf influenciam diretamente nos valores absolutos dos parâmetros de difusão, principalmente na difusividade e na dissipação. Mesmo com essa grande influência de Δt e de Δf da análise tempo-frequência, na literatura revisada, não foram encontradas referências de critérios para adoção destes valores.

Entretanto, caso eles sejam mantidos constantes, as variações nos parâmetros de difusão continuam sendo indicativas de mudança da microestrutura original.

No que se refere à instrumentação do ensaio de ultrassom, verificou-se a implementação de transdutores receptores pontuais (geralmente usa-se transdutores de 1 a 4 mm de diâmetro). Esse tipo de detecção pontual é utilizado como forma de evitar que o campo ultrassônico difuso se auto cancele na superfície do transdutor receptor. Em teoria, a recepção pontual mede somente a contribuição de um ponto coerente, sem que haja o cancelamento de fase. Além disso, notou-se a importância da medição do pulso de resposta em uma posição em que nenhum (ou quase nenhum) componente do sinal coerente seja recebido, caracterizando um sinal efetivamente difuso.

Em relação às distâncias entre transdutores, a maioria dos autores estudados adotaram distâncias igual ou menor que 6 cm, como pode ser notado na Tabela 3, a seguir, onde está apresentada uma comparação entre parâmetros adotados nas pesquisas citadas neste capítulo. Dessa forma, dentre outros aspectos, é necessário que seja avaliada a influência da distância entre transdutores e do uso do receptor pontual nos parâmetros de difusão.

Tabela 3 – Tabela comparativa entre parâmetros utilizados em diferentes pesquisas.

| Autores | Distância entre transdutores (cm) | Frequência dos transdutores (kHz) | Δt (μs) | Δf (kHz) | f_s (MHz) | Diâmetro do receptor pontual (mm) | Solução Analítica |
|--|--|--|---|------------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|
| Anugonda, Wiehn e Turner (2001) | 46 | 100-900 | 23,6 | 60 | - | 2,5 | 1D |
| Becker, Jacobs e Qu (2003) | - | 300-2000 | 6 | 300 | 50 | 1 | 2D infinita |
| Ramamoorthy, Kane e Turner (2004) | 6 | 500 | - | - | - | 2,5 | 2D finita |
| Deroo et al. (2010) | 4,6 | 1000 | 6 | 350 | 50 | 2 | 3D finita e infinita |
| Quiviger et al. (2012) | 6 | 500 | 50 | 80 | - | 4 | 2D infinita |
| Seher et al. (2012) | 6 | 500 | - | - | 50 | 2 | 2D finita |
| In et al. (2013) | 6 | 500 | 15 | 100 | 50 | 2 | 2D finita |
| In et al. (2016) | 6 | 500 | 15 | 250 | 50 | 2 | - |
| Ahn et al. (2019) | 6-12 | 200-450 | 10 | 100 | 10 | 4 | 3D infinita |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4 FUNDAMENTOS DE CONCRETO ARMADO

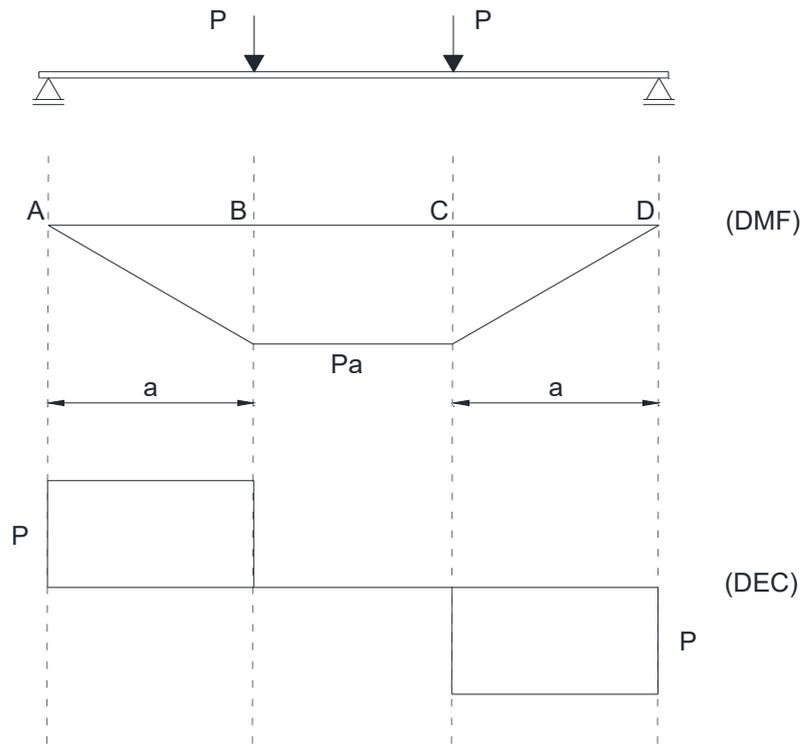
O concreto não é um material elástico-linear, pois apresenta tanto deformações elásticas quanto não-elásticas como resposta do material a carregamentos e à retração, o que geralmente leva à fissuração. As propriedades elásticas do material são medidas por sua rigidez e, apesar do comportamento não-linear do concreto, uma estimativa do módulo de elasticidade é necessária para determinar tensões e deformações de projeto (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

A rigidez de vigas de concreto armado submetidas à flexão é definida pelo produto entre o módulo de elasticidade, E , e o momento de inércia da seção, I . À medida que o carregamento aumenta sobre a estrutura, a rigidez à flexão (EI) sofre alterações devido ao surgimento de fissuras de flexão que reduzem a seção transversal e fazem que o material possivelmente trabalhe fora do regime elástico (ALMEIRA, 2005). Por essa razão, verifica-se a necessidade do estudo de propriedades mecânicas do material, de características geométricas da seção transversal e, conseqüentemente, da rigidez do elemento, o que inclui os estádios de deformação e ruptura de uma viga submetida à flexão.

4.1 VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDOS À FLEXÃO SIMPLES

Considerando uma viga de concreto armado, com seção retangular, biapoiada e submetida a um ensaio de flexão (como mostrado na Figura 25), é possível estimar grandezas relacionadas com a perda de rigidez da estrutura – como deformações absolutas e específicas do aço e do concreto e flechas – a partir de cada estágio de carregamento. Esse ensaio de flexão, conhecido como Ensaio de Stuttgart, possibilita a ocorrência simultânea de flexão pura, sem a presença de cisalhamento (trecho BC entre as cargas), e de flexão simples, com a presença do cisalhamento (trechos AB e CD). O carregamento é inserido de forma gradativa por duas cargas concentradas simétricas e mantido crescente até atingir a ruptura da viga. Nesse processo, são consideradas algumas premissas básicas que governam o comportamento elástico de estruturas, como a hipótese de Bernoulli e a Lei de Navier (CLÍMACO, 2008).

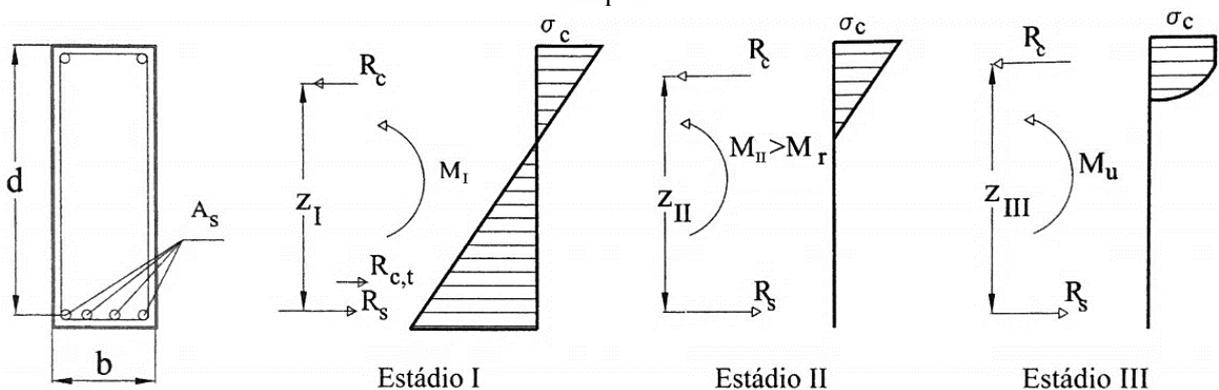
Figura 25 – Idealização estrutural do Ensaio de Stuttgart, diagrama de momento fletor (DMF) e diagrama de esforço cortante (DEC).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Dentro das considerações propostas, durante o carregamento podem ser identificados três estádios de comportamento da viga, cada um com fases bem definidas. Na Figura 26 estão representas as deformações e as tensões no aço e no concreto, assim como as resultantes dessas tensões para cada um dos Estádios, descritos a seguir com base na literatura (CARVALHO; FILHO, 2015; CLÍMACO, 2008; PINHEIRO, 2007; ROCHA et al., 2004).

Figura 26 – Comportamento da seção transversal de uma viga de concreto armado na flexão normal simples.



Fonte: Carvalho e Filho (2015), adaptado.

No Estádio I (estado elástico), a viga está submetida a um momento fletor M_I de pequena intensidade e não apresenta fissuras visíveis na matriz da pasta de argamassa, uma vez que o concreto tracionado não atingiu sua capacidade resistiva à tração. O diagrama de tensão normal na seção é linear, isto é, a tensão em cada ponto da seção varia linearmente com sua posição em relação à linha neutra, sendo válida a lei de Hooke. No final desse estágio, na iminência do concreto atingir sua resistência à tração, ocorre a plastificação da zona de concreto tracionada (limite definido com Estádio Ib).

No Estádio II (estado de fissuração), com o aumento da carga para um momento fletor $M_{II} \geq M_r$ (sendo M_r denominado momento de fissuração), a tração abaixo da linha neutra começa a superar o valor de resistência à tração do concreto, dando início ao processo de fissuração nas regiões de momento máximo. O aumento do carregamento provoca o aparecimento de novas fissuras, que se propagam até um ponto em que as seções já podem ser consideradas totalmente fissuradas. Embora o concreto esteja fissurado na região tracionada, tanto o aço tracionado quanto o concreto comprimido continuam na fase elástica. Neste estágio, caracterizado pela abertura e pela estabilização das fissuras, considera-se que somente as armaduras resistem aos esforços de tração e que o diagrama de tensão de compressão no concreto continua linear.

O momento de fissuração, M_r , segundo a norma ABNT NBR 6118:2014, é o momento fletor de limite entre os Estádios I e II, sendo definido pela Equação (25),

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t}, \quad (25)$$

onde α é um fator que correlaciona a resistência à tração na flexão com a tração direta (com valores definidos pela norma), y_t é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada, I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto e f_{ct} é a resistência à tração do concreto, também definido pela norma.

Já no Estádio III (estado de iminência de ruptura por flexão), o momento fletor assume valores que se aproximam do momento de ruína ($M_{III} = M_u$), instante em que a fibra de concreto mais comprimida excede o limite elástico e começa a plastificar a partir da deformação específica ε_{c2} , atingindo a deformação específica última ε_{cu} , sem que haja o aumento de tensão. Com a manutenção do carregamento, a seção de concreto comprimida atinge deformações próximas de ε_{cu} , caracterizando uma distribuição de tensões no concreto na forma de um diagrama parábola-retângulo. A essa altura, a peça está consideravelmente

fissurada, com fissuras de profundidades próximas à linha neutra da seção, causando uma consequente diminuição da zona comprimida de concreto. Na ruptura por flexão, idealmente a ruína ocorreria pelo esmagamento do concreto à compressão e/ou pelo escoamento do aço à tração.

De forma prática, os Estádios I e II correspondem a situações de serviços com ações reais, enquanto o Estádio III só ocorre em situações extremas, correspondendo ao estado limite último (nesse caso, $M_{III} = M_d = \gamma_f M_k$).

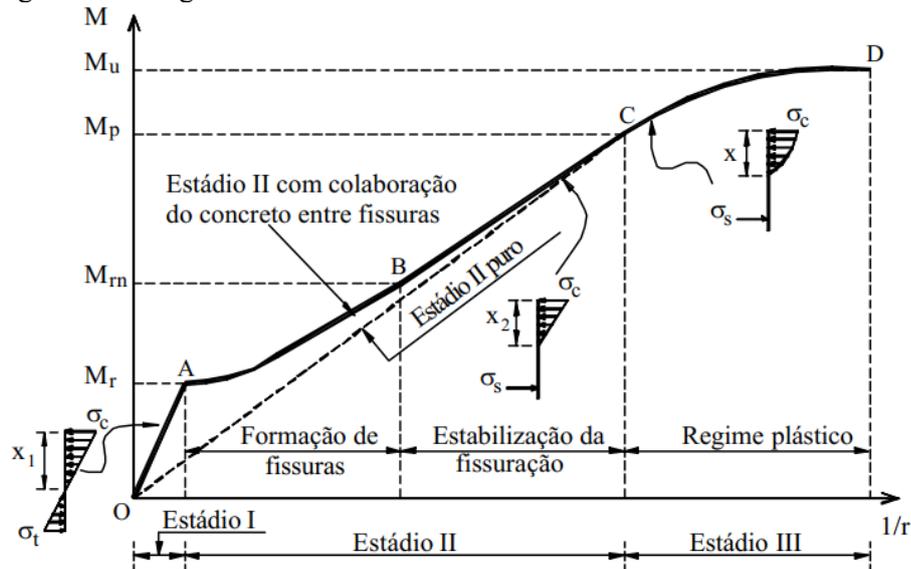
4.1.1 Rigidez à flexão

A rigidez (EI) de um elemento de concreto armado, além de sofrer influência das propriedades elásticas dos materiais e da geometria transversal, também é influenciado pelas condições de contorno, pela aderência entre o concreto e o aço e pela taxa de armadura (ALMEIDA, 2005). Nesse contexto, o módulo de elasticidade não pode ser avaliado de forma isolada, mas deve estar associado às características geométricas da seção.

Como já mencionado, a rigidez é altamente influenciada pela ocorrência de fissuras. Devido à sua composição, mesmo antes de ser carregado, o concreto possui microfissuras na zona de transição interfacial entre agregados e a matriz cimentícia. Isso causa alterações no módulo de elasticidade – devido ao aumento da deformabilidade – e afeta de maneira considerável na geometria da seção, estando relacionado à resistência à tração do concreto (ALMEIDA, 2005; GUARDA, 2005).

Embora a determinação do módulo de elasticidade estático de materiais já seja amplamente utilizada, a determinação e a avaliação da rigidez de elementos de concreto ainda geram incertezas. A avaliação dos esforços e das deformações em estruturas submetidas à flexão é feita, usualmente, por meio de relações que consideram o raio de curvatura, que está diretamente relacionada à rigidez EI . O diagrama momento-curvatura de um elemento de concreto armado fletido, relacionando a evolução da fissuração com o nível de solicitação, está representado na Figura 27.

Figura 27 – Diagrama momento-curvatura de um elemento submetido à flexão.



Fonte: Guarda (2005).

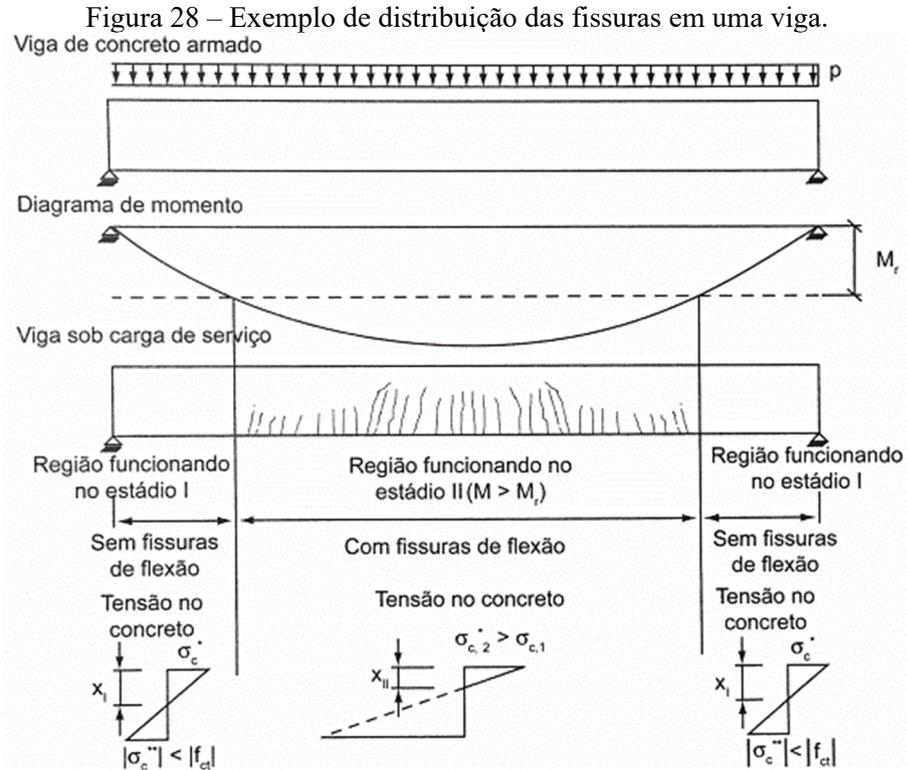
Inicialmente, no trecho OA, a seção está submetida a um momento fletor baixo e não apresenta fissuras, conforme definido no Estádio I. Considera-se que tanto o concreto comprimido quanto o tracionado, além do aço, contribuem para a rigidez à flexão da peça.

Quando o momento atinge o momento de fissuração, M_r , a tensão de tração atuante supera a resistência do concreto à tração (ponto A), a rigidez é bruscamente diminuída devido ao início da fissuração na região de momento máximo, dando início ao Estádio II. A partir desse ponto, o aparecimento de novas fissuras acarreta a diminuição da contribuição do concreto na zona tracionada e na conseqüente perda de rigidez progressiva. Esse processo continua até certo nível de carregamento (ponto B), a partir do qual ocorre o avanço e abertura das fissuras já existentes, até o ponto em que as seções já podem ser consideradas totalmente fissuradas (ponto C), caracterizando o final do Estádio II.

Quando é excedido o limite elástico no nível do momento de plastificação, M_p , os diagramas força-deslocamento e tensão-deformação deixam de ser lineares e a estrutura continua a se deformar, mesmo sem um grande acréscimo de momento. Por fim, no momento último, M_u , ocorre a ruptura por esmagamento do concreto e/ou escoamento do aço (ponto D), à medida que a linha neutra da seção se aproxima da área comprimida, como definido no Estádio III.

Uma viga de concreto armado em flexão pode apresentar variação do momento fletor ao longo do vão, surgindo regiões mais ou menos fissuradas de acordo com a amplitude do momento atuante. Considerando uma viga submetida a um carregamento distribuído (conforme representada na Figura 28), as seções próximas do apoio não apresentam fissuras

aparentes, uma vez que o momento tende a zero nessa região; no meio do vão haverá uma fissuração mais acentuada, pois o momento apresenta valores mais altos nessa região.



Fonte: Carvalho e Filho (2015).

Como o processo de fissuração varia entre os trechos da viga, também varia a rigidez, que será menor nas regiões mais fissuradas. O cálculo de dimensionamento de estruturas de concreto armado, frequentemente, despreza a resistência à tração do concreto e considera que as tensões de tração são resistidas somente pelas armaduras (consideração do Estádio II). Entretanto, em algumas etapas de carregamento ainda existem regiões não-fissuradas que estão no Estádio I e são capazes de resistir à parcela da tração, contribuindo para a rigidez da peça. Esse comportamento de enrijecimento proporcionado pelo concreto tracionado entre regiões fissuradas – e consecutivo “ganho” de rigidez – é conhecido como *tension stiffening*.

O efeito *tension stiffening* é influenciado pela aderência entre o aço das armaduras e o concreto, que promove a transmissão de esforços entre os materiais. Nos trechos em que esse fenômeno é desconsiderado (Estádio II puro), há uma subestimação da rigidez do elemento e, conseqüentemente, de sua capacidade real de carga, uma vez que as curvaturas calculadas com base nas hipóteses desse estágio serão maiores do que quando determinadas

considerando a contribuição do concreto tracionado entre fissuras (PAES, 1994), comportamento que pode ser observado na Figura 27.

Por esse motivo, uma abordagem mais próxima do comportamento real é o uso da “rigidez equivalente” que considera a contribuição de rigidez dos trechos de concreto entre fissuras e leva à uma avaliação mais acurada dos deslocamentos. Essa rigidez equivalente é obtida por meio de fatores de redução que consideram a fissuração e a não-linearidade do material e pode ser determinada para cada um desses estágios de carregamento a partir dos diferentes estados de fissuração (ALMEIDA, 2005; GUARDA, 2005).

Uma correta avaliação da rigidez de estruturas de concreto submetidas à flexão é importante para garantir sua estabilidade e segurança em situações de serviço. Admitindo que o processo de fissuração ocorre de forma progressiva com o aumento do carregamento e que não ocorre igualmente em todas as seções da peça, a rigidez inicial irá ser alterada trecho a trecho devido à redução da seção transversal, que influencia diretamente o produto de rigidez.

Baseado nos conceitos da teoria da elasticidade, a deflexão de vigas submetidas à flexão simples é inversamente proporcional à rigidez, podendo ser calculada pela integração das curvaturas ao longo do comprimento da viga (HIBBELER, 2004). Assim, a curvatura pode ser obtida pela derivada segunda da linha elástica de deflexão no comprimento, conforme Equação (26):

$$\kappa = \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{r} = \frac{M}{EI}, \quad (26)$$

onde κ é a curvatura, y é a função da linha elástica de deflexão da viga sob flexão ao longo do comprimento e r é o raio de curvatura.

Em ensaios de flexão, sendo conhecidos os valores experimentais de curvatura em cada instante, é possível obter a rigidez efetiva das vigas por meio da relação apresentada na Equação (26). Graficamente, a rigidez à flexão é representada pela inclinação da curva momento-curvatura.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DE FISSURAÇÃO

No GPEND/UFSC, já foram desenvolvidas pesquisas com o objetivo de caracterizar o estado de fissuração em elementos estruturais de concreto por meio de ensaios de ultrassom. Medeiros (2007) avaliou a capacidade de estimar a profundidade de fissuras, trincas e fendas

em concretos por meio da propagação de ondas ultrassônicas e mostrou ser possível estimar diferentes profundidades de fissuras a partir do tempo de propagação de ondas ultrassônicas, utilizando o modo de transmissão indireto.

Carelli (2014) estudou parâmetros associados à propagação de ondas de ultrassom na avaliação de elementos de concreto e de argamassa fissurados. A pesquisa abordou parâmetros nos domínios do tempo e da frequência e concluiu que a VPU foi um dos parâmetros menos eficientes nas avaliações desenvolvidas. Em contrapartida, parâmetros de energia mostraram ter grande sensibilidade à presença de fissuras e o uso de parâmetros no domínio da frequência foi considerado promissor em tais aplicações. Por sua vez, Hofmann (2015) analisou, especificamente, a sensibilidade de parâmetros que relacionam a energia do sinal ultrassônico na detecção de fissuras em elementos de concreto, confirmando a sensibilidade e o potencial do uso destes parâmetros na avaliação da fissuração em elementos de concreto armado de dimensões variadas.

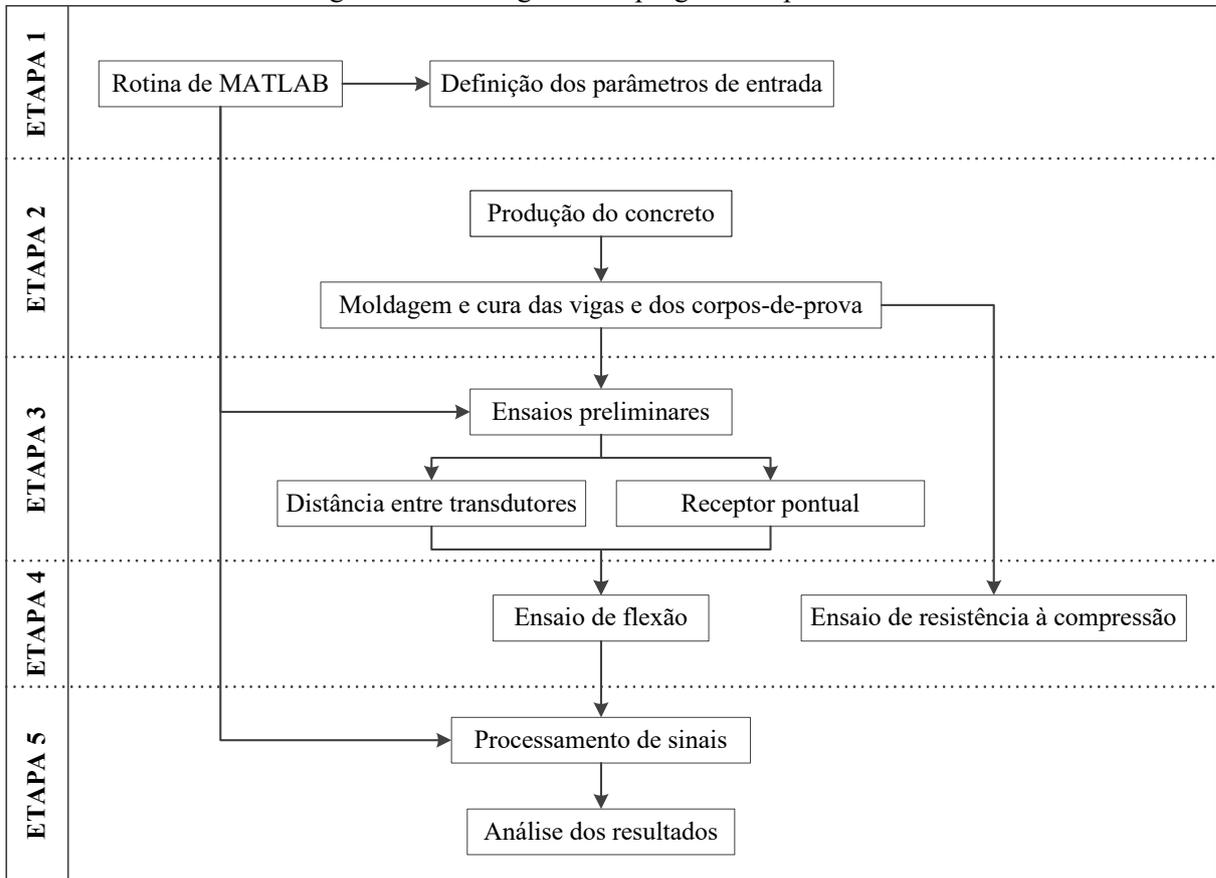
Mais recentemente, Silva (2017) realizou a avaliação da influência de fissuras de flexão na perda de rigidez de vigas de concreto armado, por meio da análise de parâmetros associados à propagação de ondas ultrassônicas no domínio do tempo. Como constatado em outras pesquisas, a VPU não foi sensível à ocorrência de fissuras. Ainda que qualitativamente, os parâmetros mais sensíveis ao processo de fissuração e, conseqüentemente, à perda de rigidez das vigas foram aqueles relacionados ao desenvolvimento da energia dos sinais ultrassônicos.

Com base nos trabalhos anteriores, é notória a influência do processo de fissuração na propagação de ondas ultrassônicas no concreto, especialmente, no que se refere a parâmetros relacionados ao domínio de frequências e ao transporte de energia ultrassônica através do material. Tendo em vista a potencialidade mostrada nas aplicações do método da difusão ultrassônica e, ainda, que este método considera aspectos relacionados ao transporte de energia através do meio e às frequências que compõem o campo ultrassônico difuso, é esperado que a aproximação da evolução temporal da densidade espectral de energia de um campo de onda ultrassônica pela equação da difusão seja um método eficaz para avaliar o comportamento de vigas submetidas a esforços de flexão, no que diz respeito à ocorrência de fissuras e à perda de rigidez.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi elaborado visando atingir os objetivos traçados e foi desenvolvido em cinco etapas, conforme fluxograma mostrado na Figura 29. A primeira etapa do programa experimental consistiu na elaboração de uma rotina no MATLAB para a análise tempo-frequência do método da difusão ultrassônica, incluindo sua validação e definição dos parâmetros de entrada. Já a segunda etapa consistiu na moldagem de vigas de concreto armado e de corpos de prova cilíndricos, desde a preparação do concreto até sua cura. Na terceira etapa, foram realizados ensaios preliminares para determinação da distância entre transdutores e para verificação da influência do uso do transdutor receptor pontual nos parâmetros de difusão. Na quarta etapa, foram realizados ensaios de ultrassom vinculados a ensaios de flexão em vigas de concreto armado, assim como ensaios para caracterização da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Por fim, a quinta etapa foi o pós-processamento dos dados obtidos nos ensaios e a análise dos resultados.

Figura 29 – Fluxograma do programa experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os ensaios utilizaram equipamentos do GPEND, do Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) e do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), todos localizados no Departamento de Engenharia Civil da UFSC, campus Florianópolis.

5.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

5.1.1 Composição do concreto

O concreto foi produzido com cimento, agregados graúdos (brita 1), agregados miúdos (areia natural e areia de britagem) e água. O cimento utilizado foi do tipo CP V-ARI, com massa específica de $3,14 \text{ g/cm}^3$. O laudo técnico com as características do cimento, fornecido pelo fabricante, encontra-se no Anexo A. Os agregados graúdos eram de origem granítica, com dimensão máxima de 19,0 mm. Os agregados miúdos foram utilizados na proporção de 50% de areia natural de rolagem, de granulometria fina, e 50% de areia de britagem de origem granítica. A caracterização dos agregados foi feita seguindo as recomendações da ABNT NBR NM 248:2003 para a determinação da distribuição granulométrica e está apresentada no Apêndice A. Os agregados graúdos e miúdos foram armazenados em tonéis de aço de 200 litros no interior do LEE e utilizados na condição úmida. A água utilizada na composição do concreto é potável, proveniente da rede de abastecimento público da cidade de Florianópolis.

5.1.2 Características do aço

Os aços utilizados para montagem das armaduras eram das categorias CA-50 e CA-60, como definido pela ABNT NBR 7480:2007, com barras de diâmetro de 10,0, 12,5 e 16,0 mm como armadura longitudinal de flexão, barras de 6,3 mm como porta estribos e fios de 5,0 mm como armadura transversal. O módulo de elasticidade do aço foi considerado igual a 210 GPa, conforme definido pela norma ABNT NBR 7480:2007.

5.1.3 Equipamento de Ultrassom

Os ensaios de ultrassom foram realizados com o aparelho Pundit Lab, da marca Proceq, mostrado na Figura 30. A utilização deste equipamento permite a visualização e a exportação dos dados do sinal ultrassônico de cada leitura por meio do *software* de análise

Pundit Link, do mesmo fornecedor do aparelho ultrassom, possibilitando a posterior avaliação dos dados. Nos dados de saída, as amplitudes das ondas são mostradas como a porcentagem da tensão de pulso utilizada.

Figura 30 – Aparelho de ultrassom Pundit Lab.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Alguns parâmetros do ensaio de ultrassom podem ser alterados por meio do Pundit Link, como a amplitude da tensão de excitação (125, 250, 350 ou 500 V), o ganho (1x, 2x, 5x, 10x, 20x, 50x, 100x, 200x, 500x ou 1000x) e o tempo de largura do pulso (0,5, 1, 2, 5 ou 10 ms). O ganho está relacionado com uma “ampliação” do formato de onda e deve ser escolhido de tal forma que os valores de amplitude estejam no intervalo entre 30 a 70% da voltagem aplicada, para que não ocorra o truncamento do sinal, que acarreta na perda de sensibilidade do ensaio e impossibilita a aplicação da aproximação por difusão (SILVA, 2017; SOUZA, 2017).

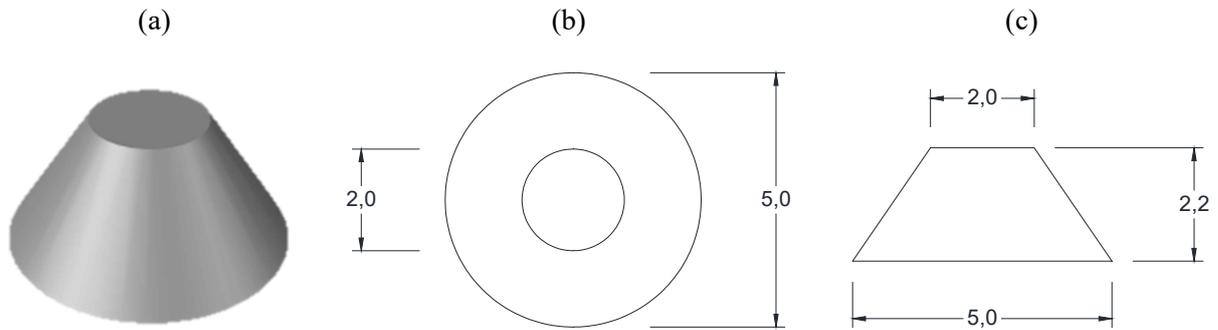
Foi utilizado um par de transdutores de frequência de 200 kHz e diâmetro de 20 mm. O acoplamento acústico entre os transdutores e a face inferior externa das vigas foi feito por uma fina camada de vaselina. A frequência de amostragem, f_s , desse equipamento é de 2 MHz, sendo gravados 10.000 pontos no intervalo de tempo de 5 ms.

5.1.4 Receptor pontual

Foi produzido um tronco de cone em aço para ser acoplado na superfície do transdutor receptor como forma de reduzir a área de contato entre o transdutor e o concreto e evitar o cancelamento de fase das ondas recebidas. O cone tem dimensões de 5 mm de

diâmetro na base maior, 2 mm de diâmetro de topo e 2 mm de espessura, conforme representado na Figura 31. Essas dimensões foram adotadas com base em valores encontrados na literatura (DEROO et al., 2010; IN et al., 2016).

Figura 31 – Detalhamento do cone: (a) perspectiva, (b) vista superior e (c) vista lateral, com dimensões em mm.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

5.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.2.1 Produção do concreto

Para a produção do concreto, utilizou-se o traço de concreto convencional dosado por SAVARIS (2016), para uma resistência à compressão axial próximo a 40 MPa e relação água/cimento de 0,52. Na Tabela 4 está apresentada a composição por metro cúbico de concreto do traço utilizado.

Tabela 4 – Composição por metro cúbico de concreto.

| Material | Consumo (kg/m ³) |
|-------------------|------------------------------|
| Cimento | 385,2 |
| Areia Natural | 418,5 |
| Areia de Britagem | 417,4 |
| Brita 1 | 964,6 |
| Água | 200,3 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A mistura do concreto foi produzida em uma betoneira intermitente de queda livre e eixo inclinado, com pás solidárias à cuba e com capacidade ótima para uso de 135 litros de

concreto (volume total de 350 litros). A sequência de colocação de materiais na betoneira obedeceu a seguinte ordem: agregados graúdos, 80% da água, cimento, agregados miúdos e o restante da água. Após a concretagem, foi feita a verificação da trabalhabilidade através o ensaio de abatimento do tronco de cone, segundo a ABNT NBR NM 67:1998.

No total, foram feitas seis betonadas para a moldagem de nove vigas. De cada betonada foram retirados três corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm para ensaio de compressão, totalizando 18 corpos de prova. O adensamento do concreto nas formas das vigas foi feito mecanicamente com o auxílio de um vibrador de agulha. Já os corpos de prova cilíndricos foram adensados e moldados manualmente seguindo as instruções da ABNT NBR 5738:2015.

Após 24 horas de concretagem, as vigas e os corpos de prova cilíndricos foram desmoldados e armazenados dentro do LEE sob lona plásticas, sendo molhados manualmente uma vez ao dia, durante os primeiros sete dias após a concretagem. Após esse processo de cura, as vigas e os corpos de prova permaneceram em condições climáticas do laboratório até a data de realização dos ensaios mecânicos.

5.2.2 Vigas de concreto armado

Foram concretados três lotes com três vigas cada um, totalizando nove vigas de concreto armado com as mesmas configurações geométricas: comprimento total de 170 cm e seção de 15 x 22 cm, alterando apenas a taxa de armadura longitudinal de flexão de um lote para o outro. As diferentes taxas de armaduras foram adotadas com o objetivo de produzir diferentes distribuições de tensão e, assim, produzir padrões diferentes de fissuração e, conseqüentemente, de perda de rigidez (IN et al., 2016). As dimensões adotadas foram definidas considerando a limitação dos equipamentos disponíveis para a realização dos ensaios.

As vigas foram dimensionadas nos domínios 2 e 3 de acordo com as expressões da norma ABNT NBR 6118:2014, considerando a resistência à compressão do concreto igual a 40 MPa, a tensão de escoamento do aço da armadura longitudinal igual a 600 MPa e dos estribos igual a 650 MPa e coeficientes de minoração de resistência unitários. Os valores de tensão de escoamento dos aços foram estimados a partir de resultados de ensaios de tração feitos em barras de aço do mesmo lote das barras utilizadas para a montagem das armaduras.

Foi obtida a carga de fissuração de 25,5 kN e a carga última foi definida em função da taxa de armadura adotada em cada lote, conforme mostrado na Tabela 5.

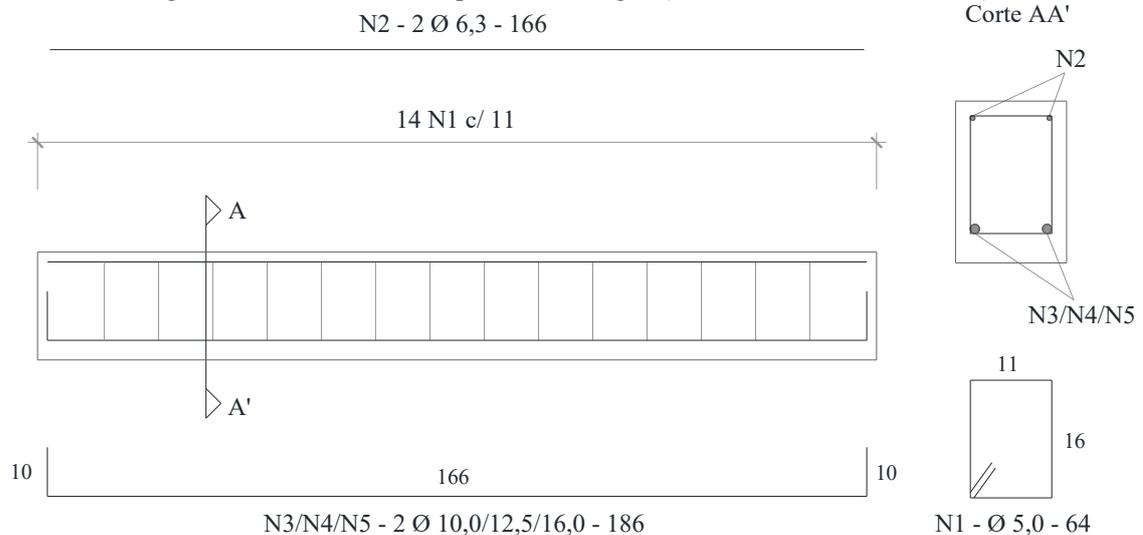
Tabela 5 – Disposição dos lotes de acordo com as taxas de armadura.

| Lote | Viga | Domínio | Armadura Londitudinal de Flexão | | | | Carga Última (kN) | Carga de Fissuração (kN) |
|------|------|---------|---------------------------------|--------|--------------------------|--------|-------------------|--------------------------|
| | | | Nº barras | Ø (mm) | A_s (cm ²) | ρ | | |
| L1 | V11 | 2 | 2 | 10,0 | 1,57 | 0,48% | 60,1 | |
| | V12 | | | | | | | |
| | V13 | | | | | | | |
| L2 | V21 | 2 | 2 | 12,5 | 2,45 | 0,74% | 91,2 | 25,5 |
| | V22 | | | | | | | |
| | V23 | | | | | | | |
| L3 | V31 | 3 | 2 | 16,0 | 4,02 | 1,22% | 140,9 | |
| | V32 | | | | | | | |
| | V33 | | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

As formas das vigas foram confeccionadas com compensado plastificado e o arranjo das armaduras foi o mesmo para todas as vigas, sendo a armadura longitudinal composta por duas barras de 10,0, 12,5 ou 16,0 mm de diâmetro, de acordo com o lote, o porta estribo composto por duas barras de 6,3 mm e a armadura transversal composta por estribos de 5,0 mm de diâmetros, espaçados de 11 cm, conforme detalhado na Figura 32. De forma a minimizar a influência da armadura na propagação das ondas ultrassônicas, foram utilizados 2,5 cm de cobertura na face superior, 2,0 cm nas laterais e 3,5 cm na face inferior. Para garantir o cobrimento, foram utilizados espaçadores plásticos tanto na parte inferior quando nas laterais das formas.

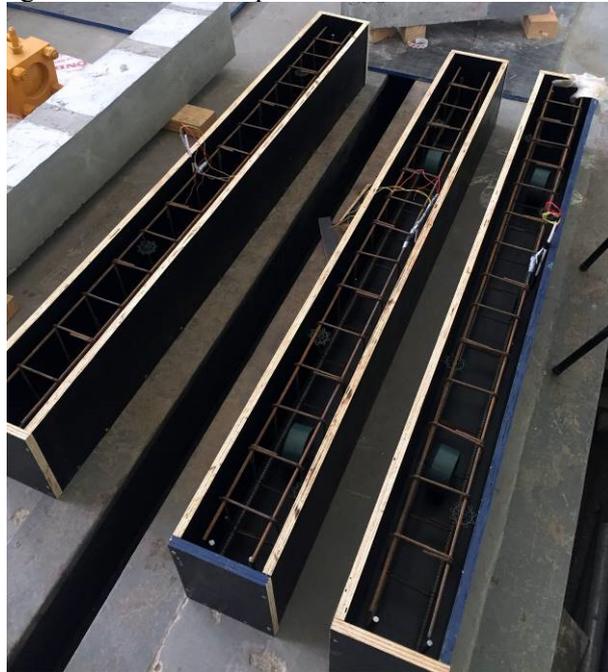
Figura 32 – Detalhamento padrão das vigas (dimensões em centímetros).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

As formas e o posicionamento das armaduras, anteriormente à concretagem de um dos lotes, estão mostrados na Figura 33.

Figura 33 – Formas e posicionamento das armaduras.

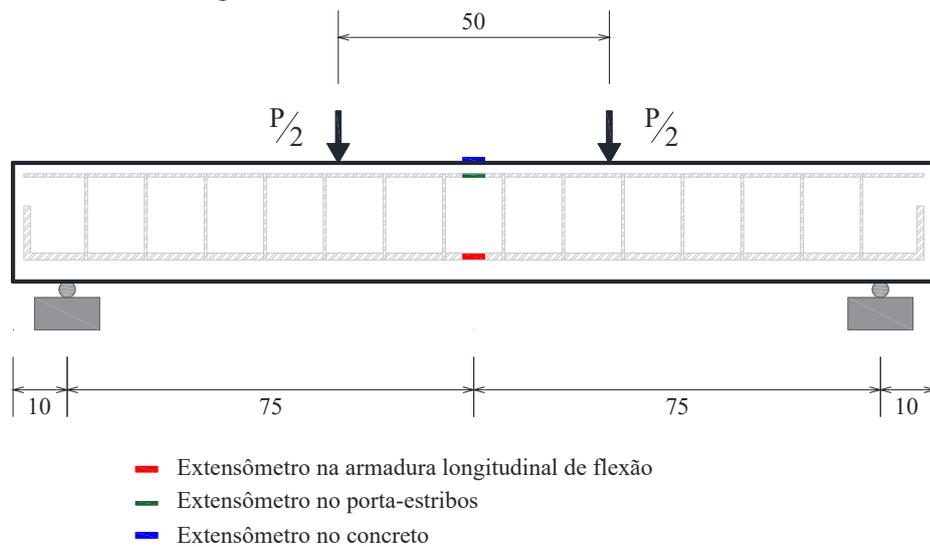


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Previamente à concretagem, foram instalados extensômetros nas barras de aço da armadura longitudinal de flexão e do porta-estribos. Após a concretagem, foram fixados os extensômetros no concreto. As instalações foram feitas como apresentado na Figura 34, visando medir as deformações da seção durante o ensaio e possibilitar a posterior correlação com a rigidez. No concreto, foram utilizados extensômetros elétricos (*strain gauge*), da marca Kyowa, tipo KC-80-120-A1-11, com comprimento igual a 84 mm. Já para o aço, tanto na armadura longitudinal de flexão quanto no porta-estribos, foram utilizados extensômetros do tipo KFGS-10-120-C1-11, também da marca Kyowa, com comprimento de 10 mm. Ambos os extensômetros foram instalados segundo as especificações do fabricante.

Após a fixação sobre as superfícies, os *strain gauges* foram protegidos com fita isolante de borracha de auto fusão, de maneira a evitar possíveis danos causados durante a concretagem. As especificações dos dois tipos de extensômetros usados estão apresentadas no Anexo B.

Figura 34 – Posicionamento dos extensômetros.



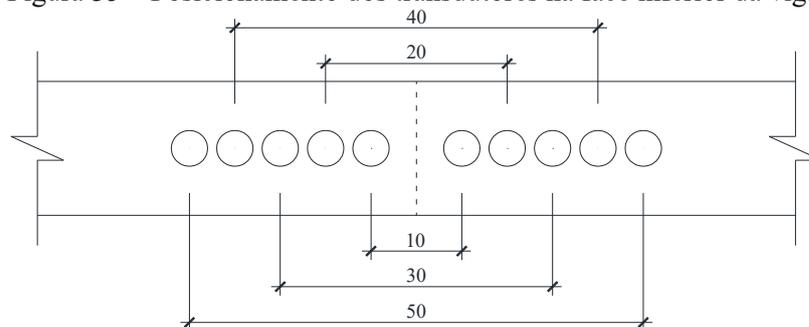
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

5.2.3 Ensaios preliminares

Preliminarmente aos ensaios de flexão das vigas de concreto armado, foram executados ensaios de ultrassom para verificar a influência da distância entre os transdutores e do uso do receptor pontual nos parâmetros de difusão e identificar uma distância adequada para utilização durante o ensaio de flexão.

Esses ensaios preliminares foram realizados em cinco posições diferentes, com distâncias de 10, 20, 30, 40 e 50 cm entre os eixos dos transdutores, posicionados em torno da seção central na face inferior da viga V33, em estado livre de carregamento. O posicionamento dos transdutores está ilustrado na Figura 35, onde a linha tracejada indica a seção central da viga. Em cada posição foram feitas 10 leituras com a utilização do receptor pontual (por meio do uso do cone de aço) e 10 leituras com o transdutor receptor sem o cone.

Figura 35 – Posicionamento dos transdutores na face inferior da viga.



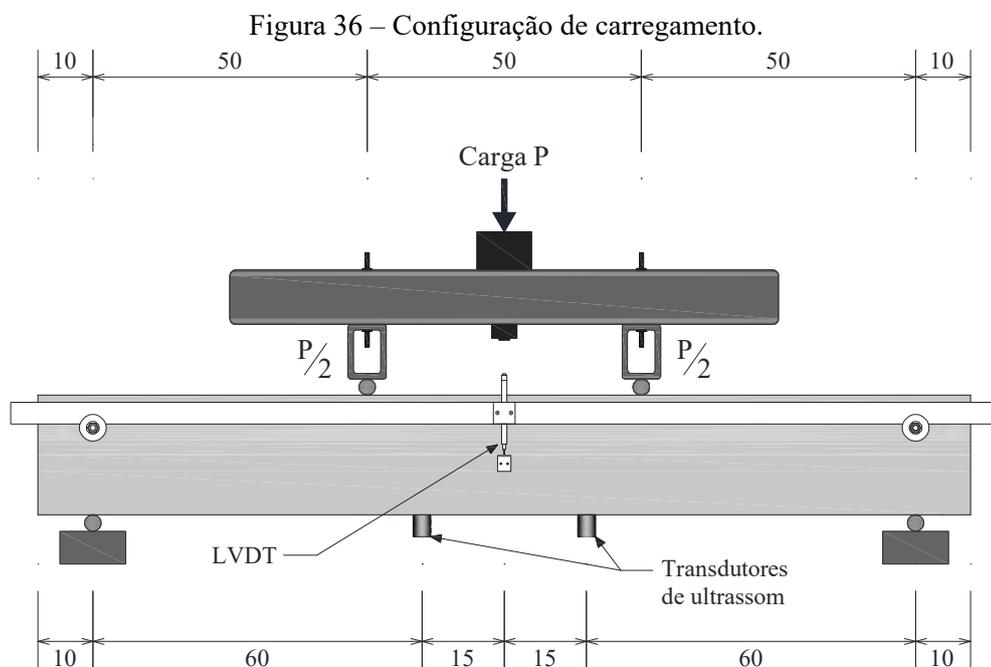
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Nos ensaios de ultrassom, a voltagem de excitação adotada foi de 125 V, com o tempo total de aquisição do sinal de 5 ms. O ganho foi ajustado de acordo com as amplitudes observadas durante o ensaio, buscando mantê-las dentro dos limites adequados. Por fim, aplicou-se o método da difusão ultrassônica nas leituras de ultrassom obtidas nos testes para obtenção dos parâmetros de difusão (difusividade, dissipação, ATME e P_0).

Com posse dos resultados dos parâmetros de difusão, para cada distância (10, 20, 30, 40 e 50 cm) e para cada condição de recepção (com e sem o receptor pontual) foram calculadas as médias, os desvios padrões e os coeficientes de variação dos 10 valores de cada parâmetro, o que possibilitou a comparação entre situações.

5.2.4 Ensaio de flexão

As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos, conforme esquema apresentado na Figura 36. O carregamento foi aplicado por duas cargas concentradas, distantes 50 cm entre si. Os apoios foram posicionados a 10 cm das extremidades das vigas, resultando em um vão livre de 150 cm. Essa configuração de ensaio foi definida a partir da literatura revisada, levando em consideração as limitações dos equipamentos utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Nas duas laterais das vigas foram instaladas barras de alumínio e, no meio do vão em ambas as barras, foram fixados transdutores lineares de deslocamento (LVDTs, do inglês *linear variable differential transformers*), da marca HBM, modelo WI-10, com curso de

10 mm, para medir o deslocamento linear vertical (flecha) durante a aplicação da carga, como mostrado na Figura 36. Uma cantoneira de aço foi parafusada no meio altura da viga em cada lateral, servindo como base para medição do deslocamento dos LVDTs. O posicionamento da instrumentação foi feito de forma a possibilitar o monitoramento adequada do comportamento da estrutura durante todo o ensaio de flexão.

A carga foi aplicada por um atuador hidráulico, da marca Vickers e capacidade de 200 kN, e medida por uma célula de carga, da marca Kratos e capacidade de 200 kN, com uma taxa de carregamento de 50 N/s até a ruptura. O sistema de aquisição de dados utilizado era composto por um aquisitor de dados *Spider 8*, da marca HBM, com oito canais de entrada disponíveis, e o *software* Catman 4.0.

Os corpos de prova cilíndricos de concreto foram ensaiados na mesma idade das vigas para determinar a resistência à compressão do concreto de cada betonada, segundo especificado pela norma ABNT NBR 5739:2018. O módulo de elasticidade foi calculado de acordo com item 8.2.8 da norma ABNT NBR 6118:2014.

5.2.4.1 Determinação das curvaturas

Conhecendo as cargas aplicadas e as deformações medidas pelos extensômetros, as curvaturas das seções centrais das vigas foram calculadas pela inclinação da reta de regressão linear entre os valores de deformação do concreto, da armadura porta-estribos e da armadura de flexão.

Visando analisar o comportamento mais geral da estrutura, ou seja, considerar as contribuições de rigidez de todas as seções ao longo do comprimento da viga, não somente a seção central, também foram calculadas as curvaturas das vigas em função dos deslocamentos lineares no centro do vão. Nesse caso, a equação da curvatura foi deduzida a partir do equacionamento teórico da flecha máxima (no centro do vão) de vigas biapoiadas considerando o esquema de carregamento utilizado nos ensaios (GERE; TIMOSHENKO, 1991), obtendo-se a Equação (27):

$$\kappa = \frac{1}{r} = \frac{216\Delta}{23L^2}, \quad (27)$$

onde Δ é a flecha no centro do vão e L é o comprimento do vão.

5.2.4.2 Cálculo das rigidezes efetivas

A partir da relação momento-curvatura, foi obtida a rigidez efetiva das vigas por meio da Equação (28), desenvolvida a partir da Equação (26), onde $(EI)_{ef}$ é a rigidez efetiva da viga, M é o momento fletor atuante e κ é a curvatura da seção associada ao momento fletor.

$$(EI)_{ef} = \frac{M}{\kappa} \quad (28)$$

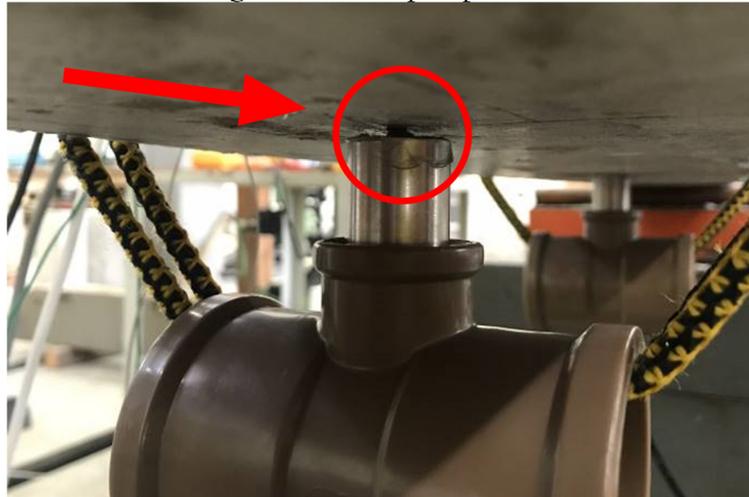
A perda de rigidez foi calculada pela razão entre a rigidez efetiva instantânea e a rigidez inicial da seção, $(EI)/(EI)_0$. A rigidez inicial, $(EI)_0$, foi considerada como sendo a rigidez efetiva do instante antes do momento de fissuração. Essa consideração se baseia no fato de que, antes de fissurar, a rigidez da seção é dita constante (inclinação constante da curva momento-curvatura no estágio I). Ao ser determinada matematicamente pela Equação (28), nos instantes iniciais, quando a curvatura é praticamente nula, a rigidez efetiva assume valores em uma ordem de grandeza muito superior aos valores subsequentes. Sendo assim, a rigidez foi considerada constante e igual a $(EI)_0$ até o início do processo de fissuração.

5.2.5 Ensaios de ultrassom

As leituras de ultrassom foram realizadas durante os ensaios de flexão por transmissão indireta, usando transdutores de frequência de 200 kHz. O modo indireto de transmissão foi escolhido para simular uma condição de medição em estruturas reais, além de proporcionar uma situação em que pouca energia coerente é recebida pelo receptor. Dessa forma, é garantido que o formato de onda recebido caracteriza um processo predominantemente difuso.

Os transdutores foram posicionados com espaçamento de 30 cm entre eixos, centralizados na seção central do vão (região de maior momento fletor), conforme ilustrado na Figura 36. Essa distância foi definida com base nos resultados dos ensaios preliminares. Além disso, foi utilizado um cone de aço (detalhado no item 5.1.4) acoplado ao transdutor receptor, caracterizando uma recepção pontual (Figura 37).

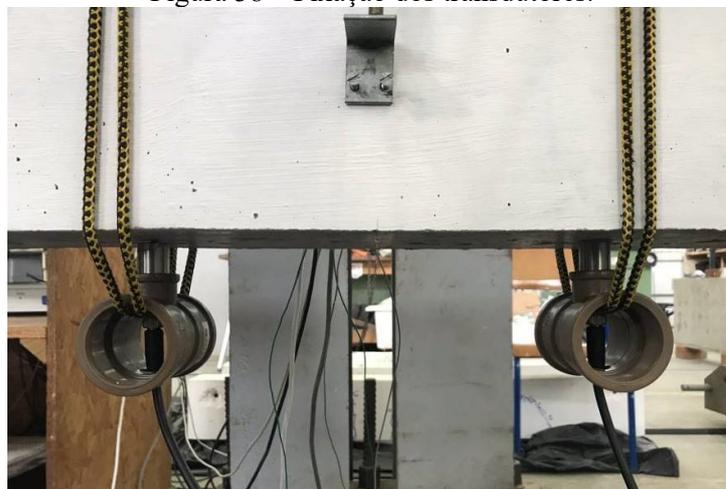
Figura 37 – Receptor pontual.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Com base em experiências já adquiridas no grupo de pesquisa GPEND/UFSC, algumas ações foram tomadas para minimizar efeitos indesejáveis de variáveis nas medições (SOUZA, 2017). Primeiramente, os transdutores foram mantidos fixos e com pressão constante durante todo o ensaio. Para isso, foram utilizados tês de redução soldáveis de PVC, de bitola 50 x 20 mm, para suporte dos transdutores. Os tês foram furados para a passagem dos cabos dos transdutores e foram mantidos presos e sob pressão constante por meio de elásticos de látex e polipropileno, com ganchos de plástico, de 1,50 m. Os elásticos foram ajustados com o mesmo comprimento e foram dadas duas voltas na viga, garantindo que a pressão nos dois transdutores fosse a mesma, como mostrado na Figura 38. Na figura abaixo, é possível observar a utilização do cone de aço no transdutor da esquerda.

Figura 38 – Fixação dos transdutores.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Também com base nas observações feitas por Souza (2017), foi utilizado vaselina sólida industrial como acoplante, material que é menos absorvido pelo concreto quando comparado a outros acoplantes em forma de gel, evitando que houvesse uma grande influência na propagação da onda devido à absorção do acoplante pelo concreto superficial. Além disso, as três primeiras leituras iniciais foram descartadas, assumindo-se que a partir da quarta leitura a absorção do acoplante deixa de ser um fator de influência.

Antes do início do ensaio de flexão, foi efetuada a calibração do aparelho de ultrassom por meio da barra de transferência, como mostrado na Figura 7. Em seguida, foram realizadas as três primeiras leituras a serem descartadas, sendo que entre cada uma das leituras foi feita a troca do acoplante e o reposicionamento dos transdutores. As duas leituras subsequentes foram executadas antes do início de aplicação da carga, no estado livre de tensões, sendo utilizadas para a determinação dos parâmetros de difusão iniciais. Com o início do ensaio de flexão, as demais leituras foram feitas com intervalo de 20 segundos entre si e, no final do ensaio, foram feitas duas leituras após a retirada total do carregamento. Em cada leitura do ultrassom foram obtidos cinco sinais.

Os sinais foram obtidos com amplitude de excitação de 500 V e tempo de aquisição de 5 ms. Durante o ensaio de ultrassom, foi feita a avaliação visual dos formatos de onda e o valor do ganho foi sendo ajustado de acordo com a necessidade. O objetivo foi obter sinais sem truncamento e que permitissem uma análise completa do formato de onda.

5.3 PROCESSAMENTO DE SINAIS

O processamento de sinais foi feito por meio de rotinas de MATLAB, inicialmente desenvolvidas e validadas no GPEND/UFSC. A partir destas, foram feitos ajustes e adaptações que otimizaram o processamento e permitiram uma análise mais automatizada e padronizada dos sinais ultrassônicos.

5.3.1 Determinação da densidade espectral de energia experimental

Após a normalização do sinal de amplitudes, procedeu-se ao cálculo da densidade espectral de energia experimental $\langle \hat{E}(x,t,f) \rangle$ para uma certa frequência f , no ponto de medição x , que foi feito por meio de uma análise tempo-frequência implementada em uma rotina do MATLAB. Os principais passos do processamento de sinais estão descritos a seguir.

1. Dividir o sinal normalizado no domínio do tempo em janelas de tempo de comprimento Δt , centradas em um tempo t_c , e com 90% de sobreposição entre si.
2. Multiplicar o sinal de cada janela de tempo pela janela de Hann. A janela de Hann é utilizada para suavizar as bordas do sinal, dando um peso menor para o sinal fora da região central da janela. Assim a sobreposição faz com que todo o sinal no domínio do tempo seja considerado para os demais cálculos. Quanto maior for a sobreposição, maior será o número de pontos de tempo.
3. Calcular a transformada discreta de Fourier (DTFT, do inglês *discrete-time Fourier transform*) para cada janela de tempo e elevar ao quadrado. Todos os passos descritos até aqui foram feitos automaticamente pela função **spectrogram** do MATLAB. Essa função tem como parâmetros de entrada o sinal no domínio do tempo, o número de pontos das janelas de tempo (já multiplicado pela janela de Hann), o valor da sobreposição entre janelas, o número de pontos da DFDT e a frequência de amostragem do sinal. Como uma de suas saídas, essa função fornece a densidade espectral de potência, que basicamente é uma tabela das transformadas de Fourier de cada janela de tempo centradas no tempo t_c .
4. Integrar a densidade espectral de potência de cada janela de tempo em uma banda de frequências de largura Δf centrada em uma frequência f_c , obtendo-se a densidade espectral de energia.
5. Construir uma tabela com os valores das densidades espectral de energia de cada ponto de tempo discreto. Esses pontos de tempo são centrados em suas respectivas janelas de tempo. Essa centralização assume que as propriedades estatísticas do sinal, como o espectro de potência e, conseqüentemente, o espectro de energia, são estacionárias em todo o comprimento da janela de tempo.

Ressalta-se que o valor resultante, denotado por $\langle \hat{E}(x, t, f) \rangle$, não é precisamente a densidade de energia ultrassônica $\langle E(x, t, f) \rangle$, mas se difere desta por um fator relacionado à medição e ao processamento do sinal, como supramencionado no item 3.1.2.

5.3.2 Recuperação dos parâmetros de difusão

Os parâmetros do método da difusão ultrassônica (D , σ e P_0) são recuperados a partir da densidade espectral de energia obtida experimentalmente por meio do ajuste com a curva da solução analítica da equação da difusão, em uma plotagem logarítmica.

Neste trabalho, foi utilizada a solução analítica considerando um domínio tridimensional infinito, descrita na Equação (20). Embora a solução tridimensional que considera domínios finitos descreva com mais realidade o comportamento temporal da densidade de energia em um corpo-de-prova com dimensões finitas, a solução infinita continua sendo válida para estimar tendências de comportamento dos parâmetros de difusão, com a vantagem de ser um modelo mais simples e de possibilitar o uso de regressão linear simples no ajuste da curva analítica à experimental, como mostrado por Deroo et al. (2010). Dessa maneira, optou-se pela utilização da solução 3D infinita.

O ajuste entre as curvas analíticas e experimentais foi feito pelo método dos mínimos quadrados, um processo de regressão linear simples. Para a regressão foram considerados somente os dados de energia sistematicamente acima do limiar de energia do ruído, definido como o nível de energia média do ruído somado a três vezes o desvio padrão, o que estatisticamente corresponde a mais de 99% da população, conforme proposto por Quiviger (2012). Essa determinação foi feita a partir da densidade espectral de energia dos 20% finais da cauda da onda, onde só há a presença de ruído. No caso de um sinal com 5 ms de duração, que é o caso dos ensaios realizados, considerou-se, então, o último milissegundo do sinal para o cálculo do limiar de energia do ruído.

As etapas do procedimento de regressão para o ajuste entre as curvas estão descritas a seguir.

1. Aplicação do logaritmo natural em ambos os lados da equação (20):

$$\ln(\langle E(r,t) \rangle) = \ln(P_0) - \ln(8) - \frac{3}{2} \ln(D\pi) - \frac{3}{2} \ln(t) - \frac{r^2}{4Dt} - \sigma t, \quad (29)$$

sendo $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

2. Para $t > 0$, define-se o termo $N(r,t) = \ln(\langle E(r,t) \rangle) + \frac{3}{2} \ln(t)$ como uma função linear f das variáveis F , G , H e t :

$$N(r,t) = \ln(\langle E(r,t) \rangle) + \frac{3}{2} \ln(t) = f(F, G, H, t) = F + Gt + \frac{H}{t}, \quad (30)$$

em que:

$$F = \ln\left(\frac{P_0}{8(D\pi)^{3/2}}\right), \quad (31)$$

$$G = -\sigma, \quad (32)$$

$$H = -\frac{r^2}{4D}. \quad (33)$$

3. A partir da densidade espectral de energia experimental $\langle \hat{E}(x, t, f) \rangle$, define-se o termo determinado experimentalmente $\hat{N}(r, t) = \ln\left(\langle \hat{E}(r, t) \rangle\right) + \frac{3}{2}\ln(t)$, que, em um senso ótimo, deve satisfazer a seguinte equação:

$$\hat{N}(r, t) = \langle N(r, t) \rangle \forall t \in [t_{start}, t_{end}], \quad (34)$$

em que t_{start} e t_{end} são os pontos de tempo inicial e final, respectivamente, do intervalo de regressão, definidos a partir do limiar de energia do ruído.

4. Da Equação (34) obtém-se uma equação para cada tempo discreto t_i , que pode ser escrito na forma de uma equação matricial linear:

$$\begin{pmatrix} 1 & t_1 & 1/t_1 \\ 1 & t_2 & 1/t_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_n & 1/t_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ G \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{N}_1 \\ \hat{N}_2 \\ \dots \\ \hat{N}_n \end{pmatrix} \quad (35)$$

ou

$$\mathbf{AX} = \hat{\mathbf{N}}. \quad (36)$$

5. Usando o método de mínimos quadrados para estimar os parâmetros de regressão (KUTNER et al., 2005), a solução da Equação (36) é dada por:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \hat{\mathbf{N}}. \quad (37)$$

Essa solução minimiza o erro ao quadrado:

$$\epsilon = \sum_{t_i} \left(\ln(\langle E(r,t) \rangle) - \ln(\langle \hat{E}(r,t) \rangle) \right)^2. \quad (38)$$

6. A partir das variáveis F , G e H obtêm-se os parâmetros P_0 , D e σ usando as Equações (31), (32) e (33).

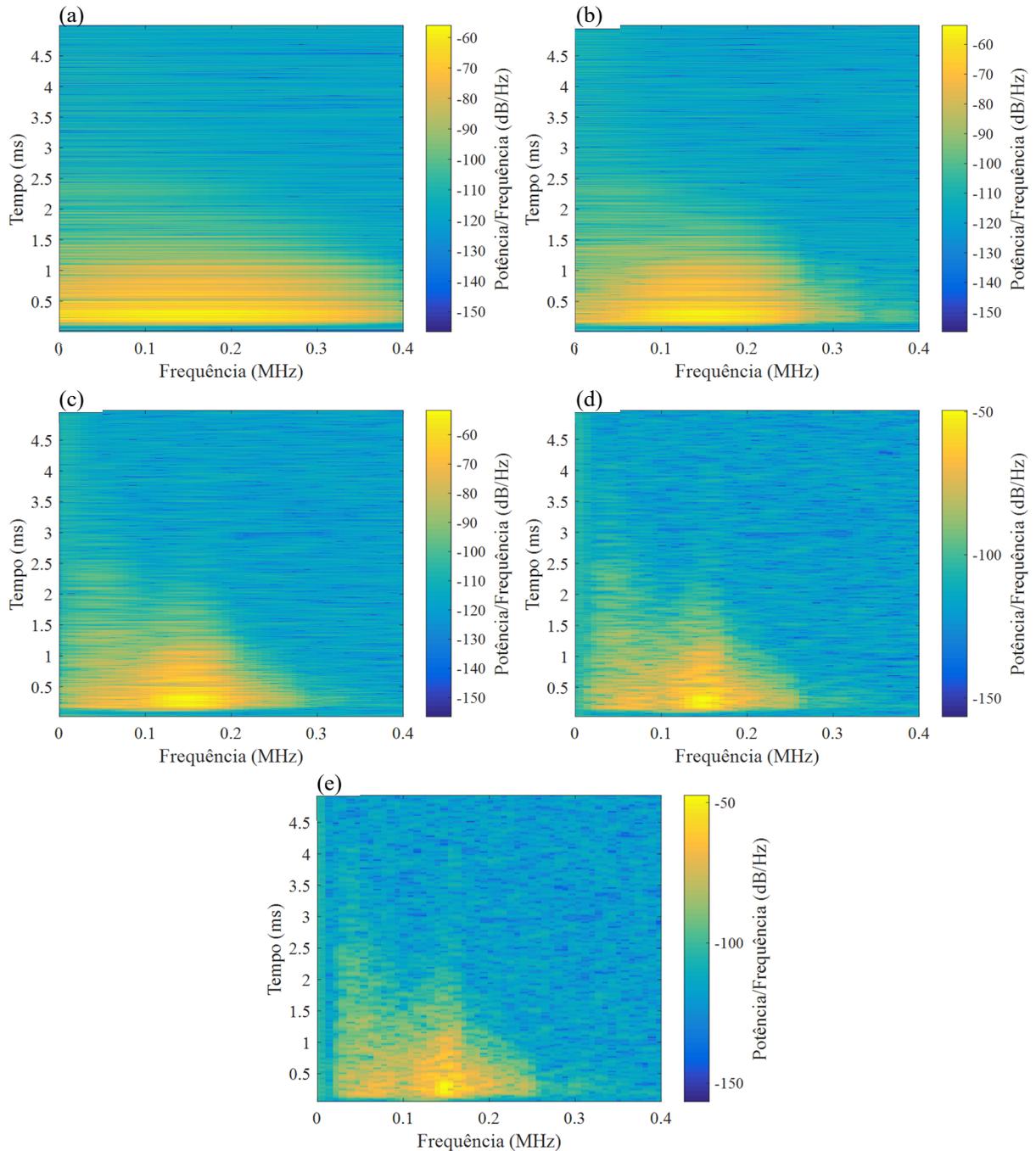
Recuperados os valores de P_0 , D e σ , têm-se a curva da densidade espectral de energia calculada pela Equação (20). O ATME é determinado a partir dessa curva, como sendo o tempo de chegada da energia máxima.

5.3.3 Parâmetros de entrada

Na determinação da densidade espectral de energia experimental foram adotados $\Delta t = 32 \mu\text{s}$ (que corresponde a 64 pontos do sinal discreto no tempo), $\Delta f = 400 \text{ kHz}$ e $f_c = 200 \text{ kHz}$ (valor nominal de excitação dos transdutores).

O valor de Δt foi adotado com base no efeito de janelamento e na resolução do sinal (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999; STOICA; MOSES, 2005), observados a partir do espectrograma de potências. Foram analisados valores de Δt iguais a 8, 16, 32 e 64 e 128 μs (que representam 16, 32, 64, 128 e 256 pontos do sinal, respectivamente). Os valores de comprimento da janela de tempo foram adotados como múltiplos de 2 para otimizar o cálculo da DTFT dentro da análise tempo-frequência. Na Figura 39 estão apresentados espectrogramas do sinal ultrassônico mostrado na Figura 65, obtidos para os diferentes valores de Δt analisados.

Figura 39 Espectrogramas das análises de sinal com Δt igual a (a) $8 \mu s$, (b) $16 \mu s$, (c) $32 \mu s$, (d) $64 \mu s$ e (e) $128 \mu s$.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Devido ao janelamento do sinal, os espectrogramas obtidos com valores menores de Δt apresentam um maior vazamento espectral, ou *spectral leakage* (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999), que pode ser identificado na Figura 39 como o maior “espalhamento” da região amarela nos espectrogramas referentes às janelas de tempo de 8 e $16 \mu s$. Esse efeito é diminuído pela utilização da janela de Hann, mas ainda é bastante

influenciado pelo comprimento da janela adotado (STOICA; MOSES, 2005). À medida que se aumenta o comprimento da janela de tempo, esse efeito é diminuído. Entretanto, aumentando Δt , há uma perda na resolução do sinal no domínio do tempo – efeito que pode ser observado com mais clareza nos espectrogramas referentes às janelas de tempo de 64 e 128 μs .

Em termos de resolução, deve haver um balanceamento entre a resolução dos domínios do tempo e da frequência. Quanto menor for o valor de Δt , maior será a resolução no domínio do tempo, ou seja, o sinal será dividido em um número maior de janelas de tempo, que estarão menos espaçadas entre si (valores de t_c mais próximos); entretanto, a resolução no domínio da frequência será menor, causado principalmente pelo vazamento espectral. Por outro lado, à medida que se aumenta o valor de Δt , os tempos centrais de cada janela de tempo ficam cada vez mais espaçados entre si, culminando na perda de resolução no domínio do tempo e, conseqüentemente, no aumento da resolução no domínio da frequência (MOUMOUNI, 2014). Isto posto, optou-se por utilizar $\Delta t = 32 \mu\text{s}$, sendo este um ponto de equilíbrio entre os efeitos mencionados nos parágrafos anteriores.

Em relação à largura da banda de frequência, Δf , é possível observar nos espectrogramas da Figura 39 que a densidade espectral de potência se concentra principalmente entre 0,1 e 0,2 MHz, se espalhando desde frequências próximas de zero até valores que chegam a ultrapassar 0,3 MHz. Dessa forma, considerando que $f_c = 200 \text{ kHz}$, adotou-se $\Delta f = 400 \text{ MHz}$, como forma de considerar todo o espectro de potência do sinal no processo de integração para a obtenção da densidade espectral de energia.

5.3.4 Pós-processamento e análise dos resultados

Com posse dos resultados da análise tempo-frequência e da obtenção dos parâmetros de difusão, que, neste trabalho, foram considerados P_0 , D e σ e $ATME$, foi feito o tratamento estatístico dos resultados por meio de estatística básica, onde foram calculados valores médios, desvios padrões e coeficientes de variação dos cinco sinais de cada leitura. Em seguida, foi mensurado o desvio dos parâmetros de cada sinal em relação à média da leitura, o que possibilitou caracterizar o comportamento médio e a variação dos parâmetros em cada instante do ensaio de ultrassom. Prosseguiu-se com o tratamento de dados para identificar e eliminar os sinais considerados espúrios.

Foram considerados espúrios os sinais que apresentaram pelo menos dois dos três parâmetros (D , σ e $ATME$) com desvio maior do que 5% em relação a sua respectiva média, de forma que todas as leituras tivessem coeficiente de variação menor do que 5%. O fator P_0 não foi considerado no tratamento de dados devido a sua aleatoriedade e ao alto índice de dispersão.

Em seguida, as leituras de ultrassom foram sincronizadas com os dados extraídos do sistema de aquisição usado no ensaio de flexão das vigas. Essa sincronização permitiu correlacionar os valores e o comportamento dos parâmetros de difusão com as diferentes etapas do ensaio de flexão, como será mostrado no capítulo a seguir.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos no programa experimental. Os resultados são referentes aos ensaios preliminares para definição da distância entre transdutores e utilização do receptor pontual; aos ensaios mecânicos, incluindo os deslocamentos verticais no vão central, as deformações do concreto e do aço e os mapas de fissuração; e aos ensaios de ultrassom e aplicação do método da difusão ultrassônica por meio do processamento de sinais.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Ainda no estado fresco, mediu-se a trabalhabilidade do concreto através do ensaio de abatimento do tronco de cone (segundo a ABNT NBR NM 67:1998), obtendo-se abatimentos de 7 ± 1 cm em todas as betonadas. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto estão mostrados na Tabela 6, onde f_{cm} é a resistência média dos três corpos de prova ensaiados de cada betonada, s_e é o desvio padrão e CV_e é o coeficiente de variação. As idades correspondem ao número de dias entre a concretagem das vigas e corpos de prova e a realização dos ensaios mecânicos, sendo que os ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos foram feitos no mesmo dia dos ensaios de flexão das vigas.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão.

| Lote | Idade (dias) | Betonada | Vigas | f_{cm} (MPa) | s_e (MPa) | CV_e (%) |
|------|--------------|----------|---------|----------------|-------------|------------|
| L1 | 102 | 1 | V11/V12 | 49,0 | 3,57 | 7,28 |
| | | 2 | V13 | 46,4 | 0,68 | 1,46 |
| L2 | 95 | 1 | V21/V22 | 46,9 | 0,80 | 1,72 |
| | | 2 | V23 | 47,7 | 0,43 | 0,90 |
| L3 | 89 | 1 | V31/V32 | 47,4 | 0,19 | 0,40 |
| | | 2 | V33 | 50,5 | 0,64 | 1,26 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

6.2 ENSAIOS PRELIMINARES

6.2.1 Distância entre transdutores

Nos ensaios preliminares para avaliar os efeitos da distância entre transdutores e do tipo de receptor nos parâmetros de difusão, o ganho utilizado nos ensaios de ultrassom foi

ajustado no decorrer das leituras e variou de acordo com a distância entre transdutores e com o uso do receptor pontual. Os valores dos ganhos utilizados estão apresentados na Tabela 7.

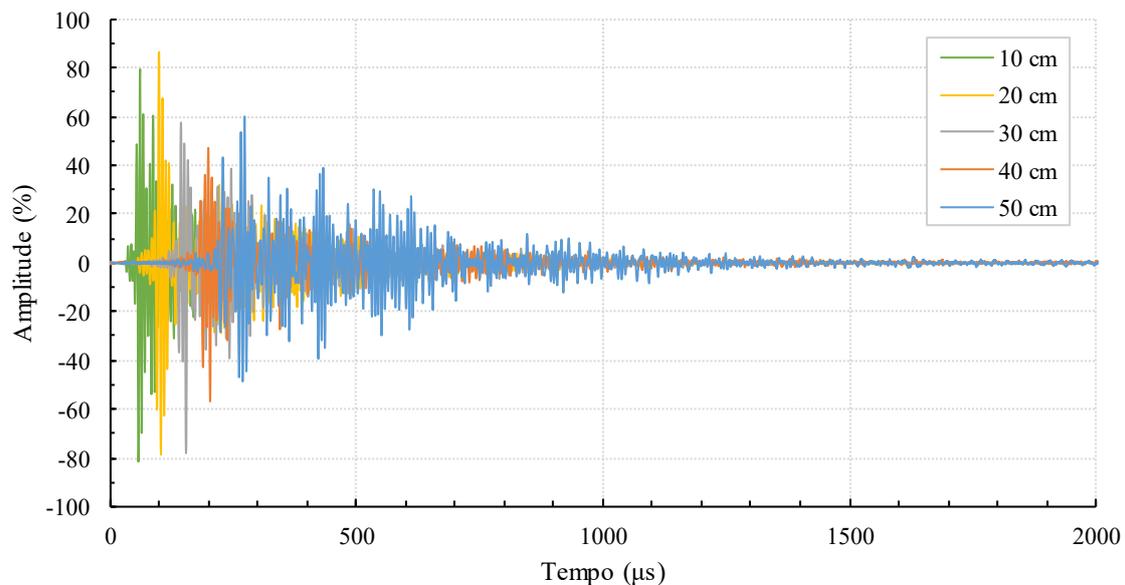
Tabela 7 – Ganhos utilizados em função da distância entre transdutores, sendo CC = com cone e SC = sem cone.

| Distância entre Transdutores (cm) | Ganho | |
|-----------------------------------|-------|------|
| | CC | SC |
| 10 | 20x | 5x |
| 20 | 50x | 10x |
| 30 | 100x | 20x |
| 40 | 200x | 100x |
| 50 | 1000x | 100x |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

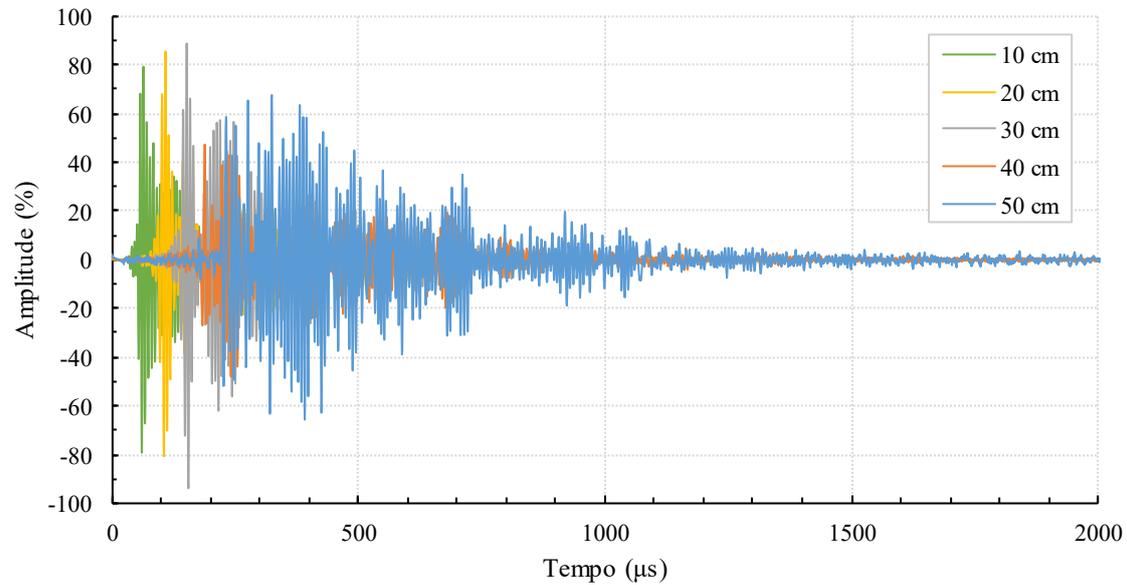
Como mostrado na tabela acima, à medida que a distância entre transdutores aumentava foi necessário aumentar o ganho para manter as amplitudes em uma ordem de grandeza desejável, chegando ao ganho de 1000x nos ensaios com a utilização do receptor pontual e de 100x nos ensaios sem o cone. Exemplos de sinais ultrassônicos obtidos para cada distância entre transdutores estão mostradas na Figura 40 e na Figura 41, para os ensaios sem a utilização do cone e com a utilização do cone, respectivamente.

Figura 40 – Pulsos ultrassônicos obtidos em diferentes distâncias entre transdutores, sem a utilização do cone.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 41 – Pulsos ultrassônicos obtidos em diferentes distâncias entre transdutores, com a utilização do cone.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Como pode ser observado nas figuras acima, sem a utilização do cone houve um decaimento significativo da amplitude máxima para as distâncias acima de 20 cm, mesmo com o aumento do ganho utilizado. Já com o cone, essa redução ocorreu acima dos 30 cm. Inversamente à diminuição da amplitude máxima (que está relacionada à chegada de ondas diretas), houve o aumento de ondas *codas*, ou seja, para distâncias maiores entre transdutores, verificou-se chegadas de ondas mais tardias. Essa característica foi observada pelo maior “espalhamento” do formato de onda com o aumento da distância entre transdutores.

Com base nesses resultados, visando a aplicação nessa pesquisa, adotou-se a distância de 30 cm nos ensaios de ultrassom realizados durante o ensaio de flexão. Essa distância permite a caracterização de uma região relativamente maior das vigas, sem a necessidade da utilização de um ganho muito alto nas primeiras leituras. Era esperado que fosse necessário aumentar o ganho com a propagação das fissuras de flexão; dessa forma, a necessidade de um ganho mais alto logo no início, como é o caso das distâncias de 40 e 50 cm, poderia prejudicar a aquisição dos sinais ultrassônicos durante os ensaios de flexão. Dependendo da finalidade de aplicação, outras distâncias devem ser analisadas de forma a identificar a melhor distância em cada caso.

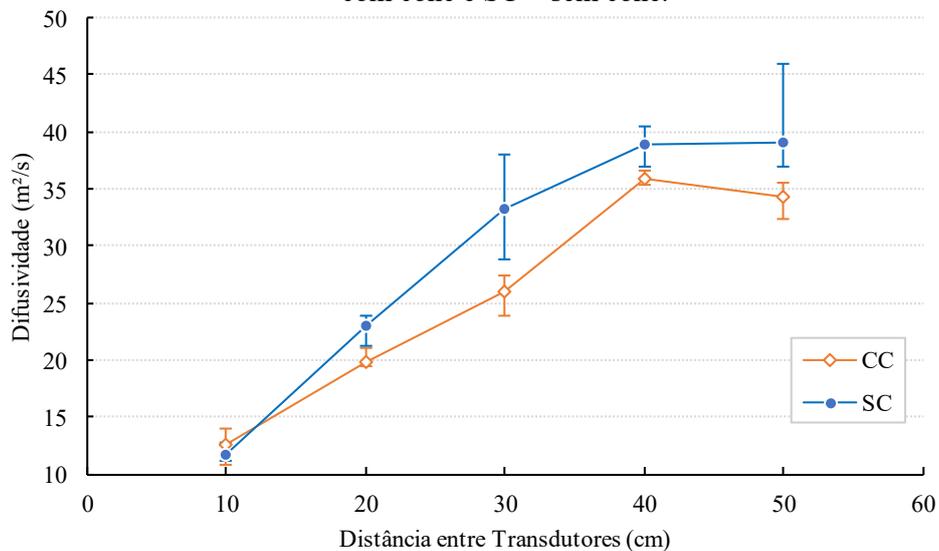
6.2.2 Utilização do receptor pontual

Os efeitos da utilização do receptor pontual foram avaliados a partir do comportamento e da dispersão dos parâmetros de difusão, considerando os dois casos de recepção estudados. Dessa forma, a partir das 10 leituras feitas em cada posição das duas situações avaliadas, foram recuperados os parâmetros de difusão, que serão apresentados e discutidos a seguir.

6.2.2.1 Difusividade

O gráfico com o comportamento da difusividade em função da distância entre transdutores está mostrado na Figura 42, onde as barras de erro representam a dispersão dos valores máximos e mínimos em relação à média das 10 leituras.

Figura 42 – Comportamento da difusividade em função da distância entre transdutores, sendo CC = com cone e SC = sem cone.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Em geral, os ensaios realizados sem o cone apresentaram valores médios maiores de difusividade. Em ambas as situações esse parâmetro seguiu o mesmo comportamento, aumentando em função da distância entre transdutores até 40 cm. Para 50 cm, o valor da difusividade se manteve aproximadamente constante no ensaio sem o cone, mas no caso com o receptor pontual houve uma diminuição em relação ao valor de 40 cm.

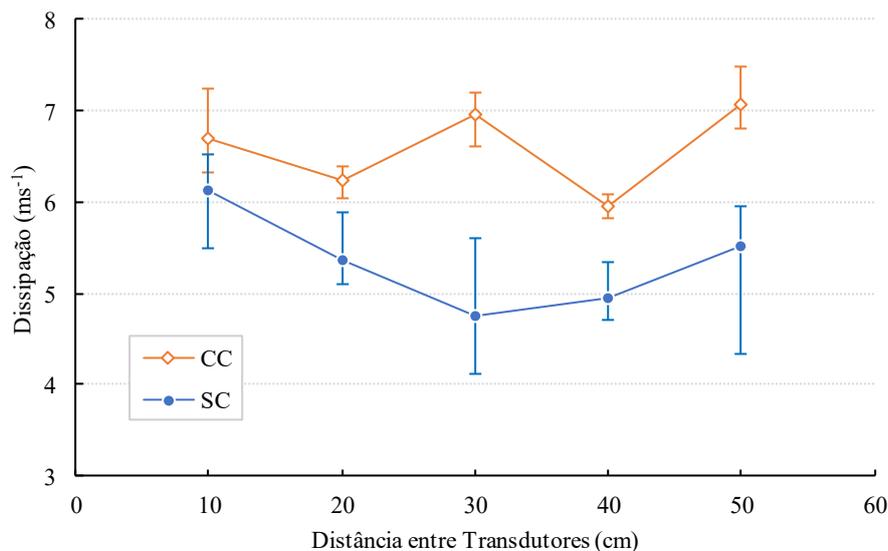
Era predito que o valor da difusividade fosse independente da distância entre transdutores (WEAVER; SACHSE, 1995); entretanto, os resultados apresentados mostram uma dependência da distância nos valores de difusividade, assim como tem sido observado recentemente por outros autores (JIANG et al., 2019; AHN et al., 2019; ZHAN; JIANG; JIANG, 2019).

Observa-se, ainda, que a amplitude de variação dos valores de cada posição, representada pelas barras de erro na Figura 42, é maior nas leituras sem a utilização do receptor pontual. A análise de dispersão dos valores de difusividade, contendo as médias, os desvios padrões e os coeficientes de variação do parâmetro em cada posição, está disposta no Apêndice F.

6.2.2.2 Dissipação

O comportamento da dissipação em função da distância entre transdutores está apresentado na Figura 43, onde as barras de erro correspondem à dispersão dos valores máximos e mínimos dos dados em relação à média das 10 leituras. Os valores médios, os desvios padrões e os coeficientes de variação da taxa de dissipação em cada posição estão apresentados no Apêndice F.

Figura 43 – Comportamento da dissipação em função da distância entre transdutores, sendo CC = com cone e SC = sem cone.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Uma vez que a dissipação é caracterizada pelas propriedades viscoelásticas do material e os ensaios foram realizados na mesma viga, esperava-se obter um comportamento

aproximadamente constante, sem grandes variações em função da distância (WEAVER; SACHSE, 1995). Entretanto, a dissipação apresentou variações significativas, como pode ser observado na Figura 43. Nos ensaios realizados com o cone acoplado ao receptor, a dissipação não teve um padrão bem definido. Já no caso sem o receptor pontual, o valor da dissipação diminui até a distância de 30 cm, voltando a crescer nas distâncias de 40 e 50 cm.

Considerando que os valores da taxa de dissipação deveriam ser constantes e independentes da distância entre transdutores, foram calculados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) agrupando os valores de dissipação de todas as posições dos ensaios com e sem o receptor pontual. Os resultados estão mostrados na Tabela 8, onde CC representa a situação com o cone e SC sem o cone.

Tabela 8 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de dissipação.

| | Média (ms⁻¹) | Desvio padrão (ms⁻¹) | CV (%) |
|-----------|--------------------------------|--|---------------|
| CC | 6,56 | 0,46 | 7,0% |
| SC | 5,34 | 0,62 | 11,6% |

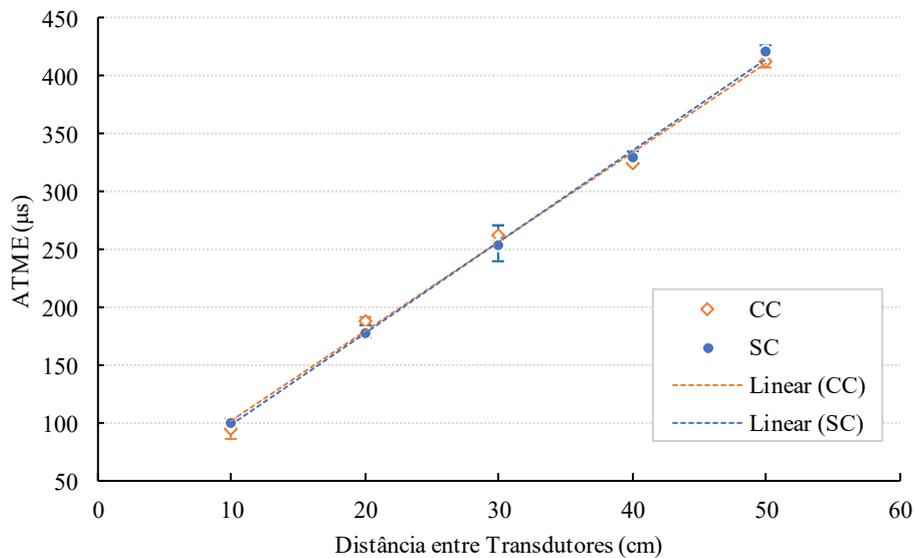
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os valores médios e a variação obtidos estão de acordo com os resultados apresentados por Anugonda, Whien e Turner (2001), Quiviger et al. (2012) e Ahn et al. (2019). Avaliando tanto os CV apresentados na Tabela 8 quanto as dispersões representadas pelas barras de erro na Figura 43, observa-se que há uma maior variação dos valores de dissipação na condição sem o cone.

6.2.2.3 ATME

O ATME foi o parâmetro que apresentou as menores variações (representado pelas barras de erro), tanto entre as leituras feitas na mesma posição, quanto entre as duas configurações de ensaio, como pode ser observado na Figura 44.

Figura 44 – Comportamento do ATME em função da distância entre transdutores, sendo CC = com cone e SC = sem cone.



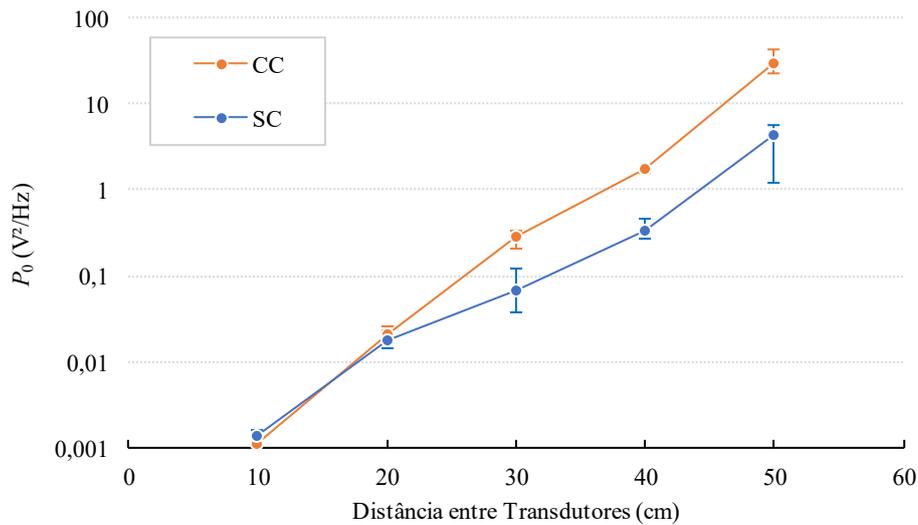
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Como esperado, o ATME apresentou um comportamento dependente da distância entre transdutores, crescendo linearmente com o aumento da distância. As linhas mostradas na Figura 44 foram obtidas pela regressão linear entre os valores médios de ATME de cada posição. Observa-se que as linhas para ambos os casos estão praticamente sobrepostas, mostrando que esse comportamento linear é persistente nas duas situações. Ressalta-se que a análise de dispersão dos valores de ATME obtidos em cada posição (médias, desvios padrões e coeficientes de variação) está apresentada no Apêndice F.

6.2.2.4 Fator P_0

Por fim, o comportamento do P_0 está representado na Figura 45, onde as barras de erro representam a variabilidade do parâmetro em relação a seus valores máximos e mínimos, e na Tabela 9, que indica os valores médios, os desvios padrões e os coeficientes de variação (CV) desse parâmetro para cada posição analisada.

Figura 45 – Comportamento do P_0 (em escala logarítmica) em função da distância entre transdutores, sendo CC = com cone e SC = sem cone.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 9 – Variabilidade do fator P_0 , sendo CC = com cone e SC = sem cone.

| Utilização do cone | Distância entre Transdutores (cm) | P_0 (V ² /Hz) | | |
|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------|--------|
| | | Média | Desvio Padrão | CV (%) |
| CC | 10 | 0,00111 | 0,000075 | 6,76 |
| | 20 | 0,02106 | 0,002476 | 11,76 |
| | 30 | 0,27811 | 0,035052 | 12,60 |
| | 40 | 1,72053 | 0,093381 | 5,43 |
| | 50 | 29,82241 | 6,302134 | 21,13 |
| SC | 10 | 0,00138 | 0,000203 | 14,74 |
| | 20 | 0,01738 | 0,004058 | 23,35 |
| | 30 | 0,06843 | 0,026663 | 38,97 |
| | 40 | 0,33271 | 0,072587 | 21,82 |
| | 50 | 4,30955 | 1,639108 | 38,03 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O P_0 apresentou um crescimento aproximadamente exponencial com o aumento da distância, sendo o parâmetro com as maiores variações, chegando a coeficientes de variação de 21% e 38% na distância de 50 cm para os ensaios com o cone e sem o cone, respectivamente. A variabilidade do P_0 foi mais alta sem a utilização do cone. Como não foram encontradas referências na literatura em relação a valores esperados e ao comportamento desse parâmetro, não é possível obter demais conclusões a partir dos dados.

6.2.2.5 Conclusão

Com base nos resultados dos parâmetros de difusão, tanto para os casos com a utilização do receptor pontual quanto para os casos sem o cone, optou-se pela utilização do cone de aço acoplado ao transdutor receptor, pois essa condição apresentou uma menor dispersão dos resultados. Além disso, uma vez que na bibliografia apresentada os autores utilizaram o receptor pontual, considerou-se válida sua utilização como forma de permitir possíveis comparações entre os resultados obtidos na presente pesquisa e os resultados de outros autores.

6.3 ENSAIOS DE FLEXÃO

6.3.1 Carregamento e esforços de fissuração e de ruptura

Como mostrado na Tabela 6, os ensaios de flexão dos lotes L1, L2 e L3 foram feitos aos 102, 95 e 89 dias de idade do concreto, respectivamente. As cargas e os momentos de fissuração e de ruptura obtidos nos ensaios estão mostrados na Tabela 10. Estes valores foram obtidos a partir do gráfico carga-deslocamento mostrados no item 6.3.4 a seguir.

Tabela 10 – Cargas e momentos de fissuração e de ruptura experimentais.

| Lote | Viga | Fissuração | | Ruptura | |
|------|------|------------|----------------------|------------|----------------------|
| | | Carga (kN) | Momento Fletor (kNm) | Carga (kN) | Momento Fletor (kNm) |
| L1 | V11 | 19,4 | 4,9 | 76,2 | 19,1 |
| | V12 | 18,5 | 4,6 | 74,6 | 18,7 |
| | V13 | 16,2 | 3,5 | 76,4 | 19,1 |
| L2 | V21 | 19,1 | 4,8 | 113,7 | 28,4 |
| | V22 | 19,1 | 4,8 | 118,5 | 29,6 |
| | V23 | 17,5 | 4,4 | 119,2 | 29,8 |
| L3 | V31 | 13,8 | 3,4 | 152,2 | 38,0 |
| | V32 | 14,5 | 3,6 | 155,2 | 38,8 |
| | V33 | 12,1 | 3,0 | 145,4 | 36,3 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

As cargas de fissuração anotadas dos experimentos ficaram abaixo da carga de fissuração estimada, calculada a partir da formulação apresentada na norma ABNT NBR 6118:2014 e apresentada na Tabela 5. Em média, as cargas de fissuração experimentais das

vigas do lote L1 foram 32% mais baixas do que o valor esperado, enquanto no lote L2 foram 27% mais baixa e no lote L3, 47% mais baixas, sendo essa a maior diferença.

Em relação às cargas últimas, os valores experimentais foram mais elevados do que o estimado: aproximadamente 26% em relação ao lote L1, 28% no lote L2 e 7% no lote L3.

6.3.2 Modos de ruptura

Os modos de ruptura das vigas estão mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Modos de ruptura das vigas.

| Lote | Viga | Modo de Ruptura | Obs. |
|-------------|-------------|------------------------|---|
| L1 | V11 | Flexão | Escoamento do aço |
| | V12 | Flexão | Escoamento do aço |
| | V13 | Flexão | Escoamento do aço |
| L2 | V21 | Cisalhamento | |
| | V22 | Cisalhamento | Início do escoamento do aço e do esmagamento do concreto antes da ruptura |
| | V23 | Flexão | Escoamento do aço, com início do esmagamento do concreto |
| L3 | V31 | Flexão | Esmagamento do concreto |
| | V32 | Flexão | Esmagamento do concreto |
| | V33 | Cisalhamento | |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

De forma geral, como esperado, as vigas dos lotes L1 e L2 tiveram modos de ruptura característicos do domínio 2 (ruptura pelo escoamento do aço, com possível início do esmagamento do concreto no limite com o domínio 3), enquanto o lote L3 rompeu por esmagamento do concreto, característica do domínio 3.

As vigas foram dimensionadas e verificadas de maneira a evitar o rompimento brusco por cisalhamento, comportamento constatado nas vigas V21, V22 e V33 (embora a viga V22 tenha apresentado início do escoamento do aço e do esmagamento do concreto, que era o modo de ruptura esperado). Uma possível explicação para esse comportamento é a resistência das barras de aço das armaduras ser maior do que a tensão de escoamento utilizada nos dimensionamentos. Dessa forma, a seção passa a ser mais resistente à tração na flexão, favorecendo a ruptura por cisalhamento na região de maior esforço cortante.

6.3.3 Mapas de fissuração

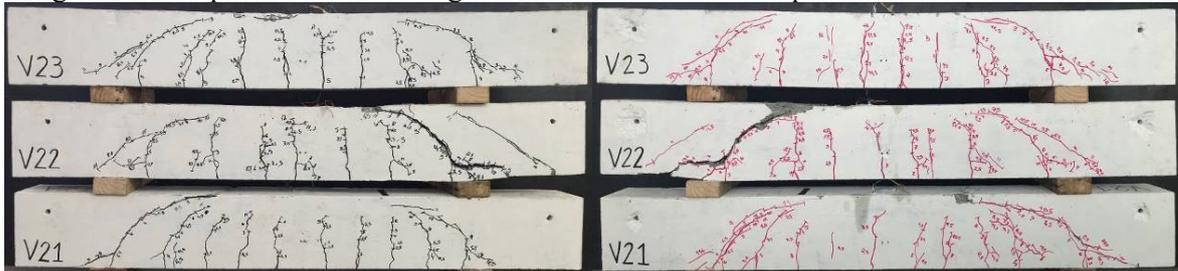
Durante os ensaios de flexão, as fissuras foram marcadas e referenciadas com o valor da carga (em tonelada-força) na qual elas foram identificadas, formando um mapa de fissuras. Os mapas da fissuração das vigas dos lotes L1, L2 e L3 estão apresentados na Figura 46, na Figura 47 e na Figura 48, respectivamente.

Figura 46 – Mapa de fissuras das vigas do lote L1: lado 1 na cor preta e lado 2 na cor vermelha.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 47 – Mapa de fissuras das vigas do lote L2: lado 1 na cor preta e lado 2 na cor vermelha.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 48 – Mapa de fissuras das vigas do lote L3: lado 1 na cor preta e lado 2 na cor vermelha.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

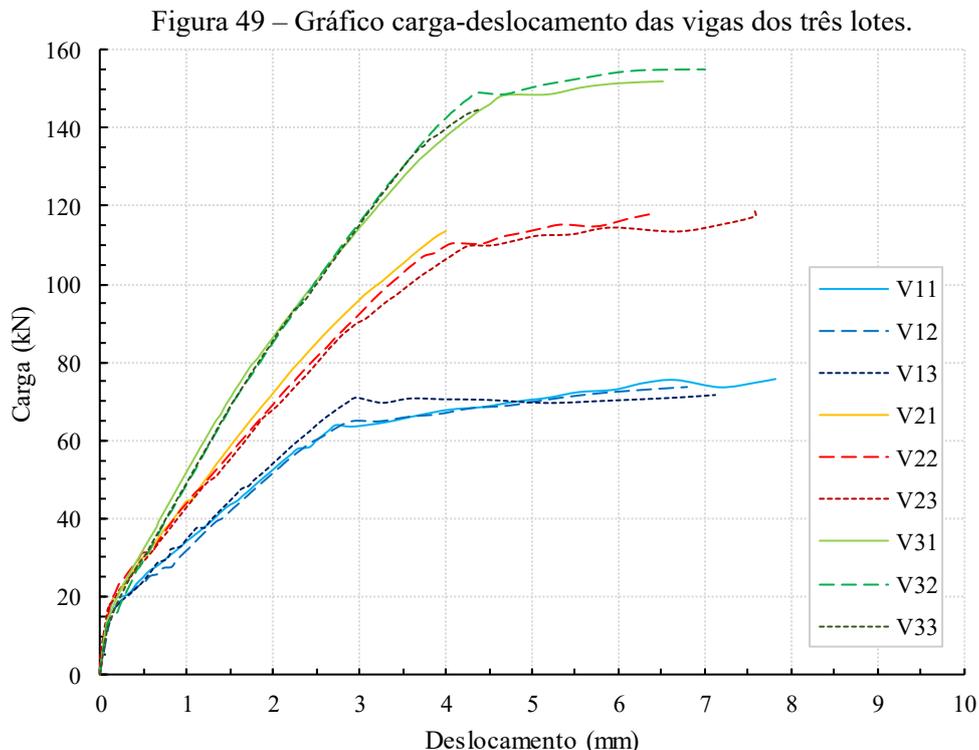
De forma geral, o processo de aparecimento e de propagação das fissuras de flexão apresentou um comportamento bastante semelhante em todas as vigas. O início da fissuração se dava na região central da viga, entre os pontos de aplicação da carga (região de momento máximo), sempre na direção vertical, com início na face inferior/tracionada com sentido para cima. Com o aumento do carregamento, as fissuras se espalhavam em direção aos apoios da

viga, de forma que, quanto mais perto do apoio, mais as fissuras eram inclinadas (como pode ser visto nas figuras acima).

Nas vigas V21, V22 e V33, que romperam por cisalhamento, é possível ver o plano de ruptura ligando um dos pontos de aplicação da carga ao ponto de apoio, entre os quais ocorreu a fissura de cisalhamento que levou à ruptura. Salienta-se que, embora o modo de ruptura dessas vigas não tenha ocorrido conforme o esperado, ou seja, para o qual elas foram dimensionadas, esse comportamento não invalida a utilização destas para a posterior correlação com os parâmetros de ultrassom. Na região de interesse (região central), essas vigas desenvolveram o mesmo padrão de fissuras de flexão que as demais, apresentando, inclusive, o patamar de escoamento do aço. Elas passaram a se comportar de forma diferenciada somente próximo da carga última.

6.3.4 Deslocamentos

Os deslocamentos medidos pelos LVDTs no vão central das vigas dos lotes L1, L2 e L3 estão mostrados nos gráficos carga-deslocamento apresentado na Figura 49. As curvas representam a média dos deslocamentos medidos pelos dois LVDTs instalados nas laterais de cada viga, na mesma posição.

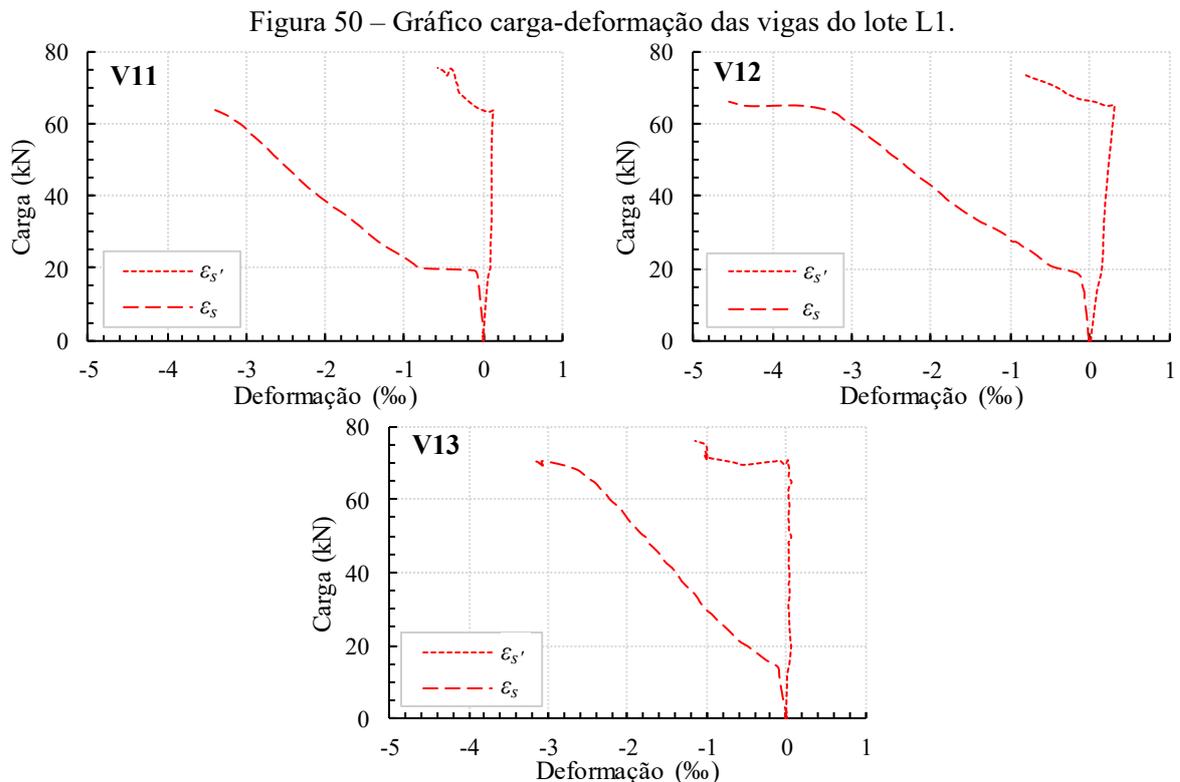


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Próximo da carga de ruptura, em geral, as vigas apresentaram um desempenho dúctil bem acentuado, com um patamar de grandes deslocamentos para um acréscimo pequeno da carga aplicada. Esse efeito é percebido em todos os lotes, como pode ser visto na figura acima.

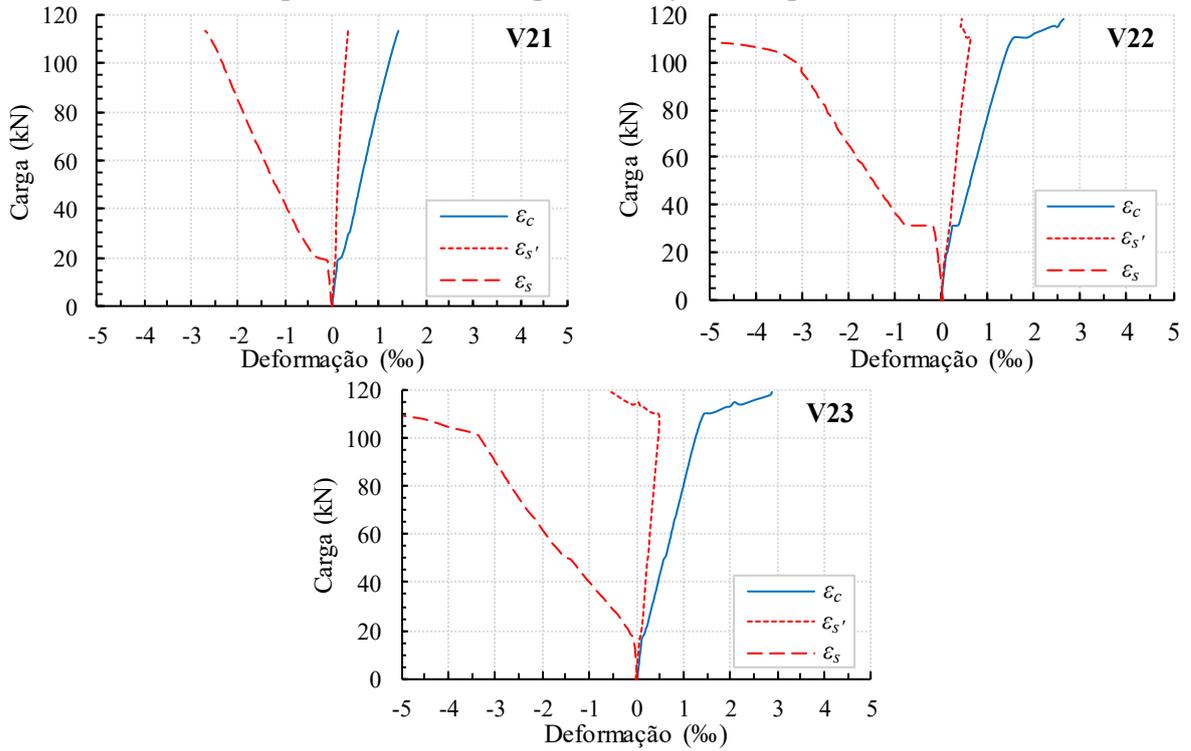
6.3.5 Deformações

Os valores de deformações medidos pelos extensômetros estão mostrados nos gráficos carga-deformação apresentados na Figura 50, na Figura 51 e na Figura 52, respectivamente, onde ε_c é a deformação do concreto, ε_s' é a deformação do aço da armadura porta-estribo e ε_s é a deformação da armadura longitudinal de flexão. Devido a problemas experimentais, não foram registradas as deformações do extensômetro instalado no concreto das vigas do lote L1. Considerou-se como positivas as deformações de compressão (encurtamento) e como negativas as deformações de tração (alongamento).



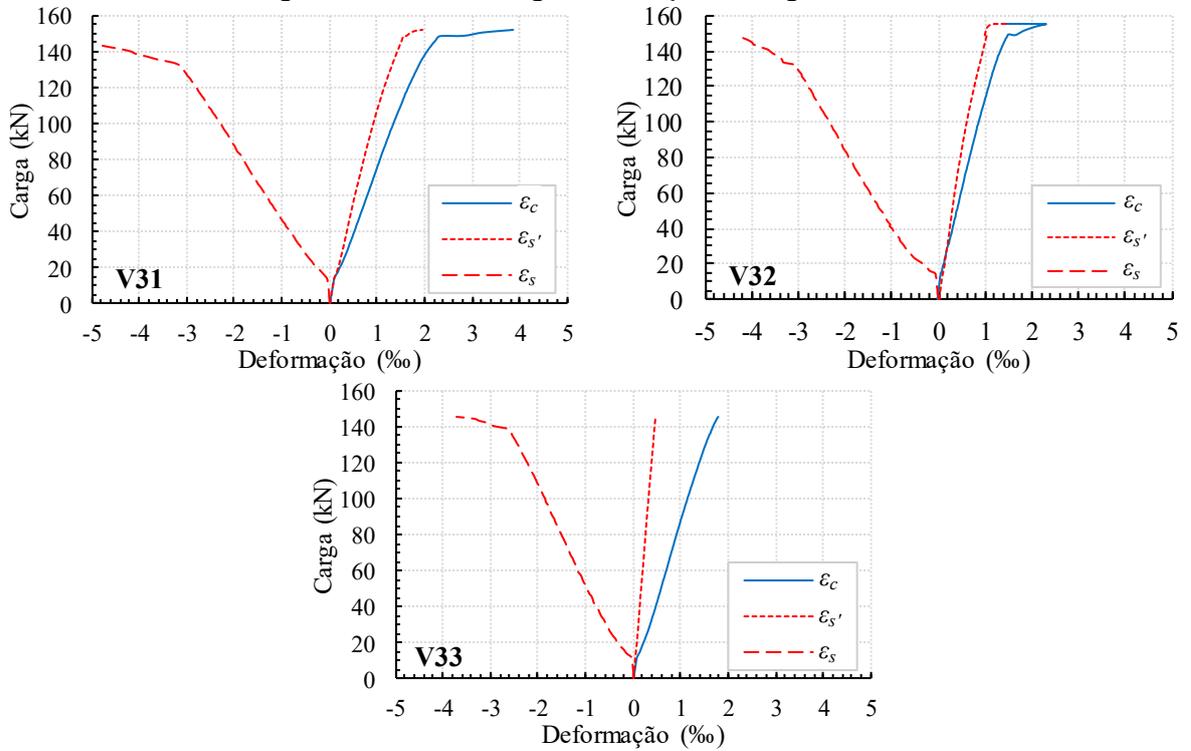
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 51 – Gráfico carga-deformação das vigas do lote L2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 52 – Gráfico carga-deformação das vigas do lote L3.

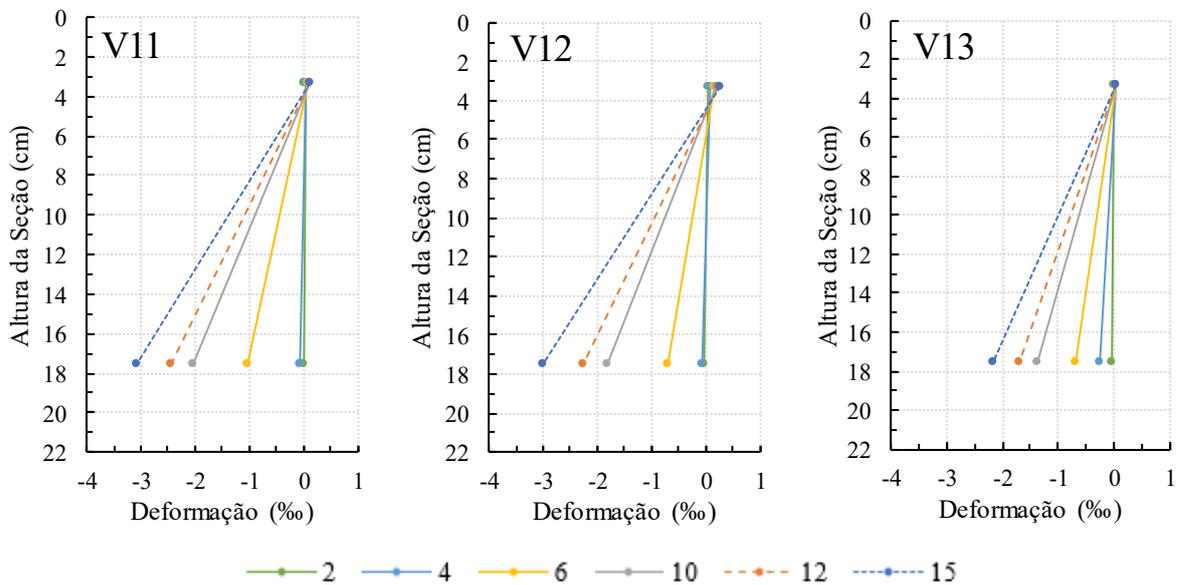


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

6.3.5.1 Deformação das seções

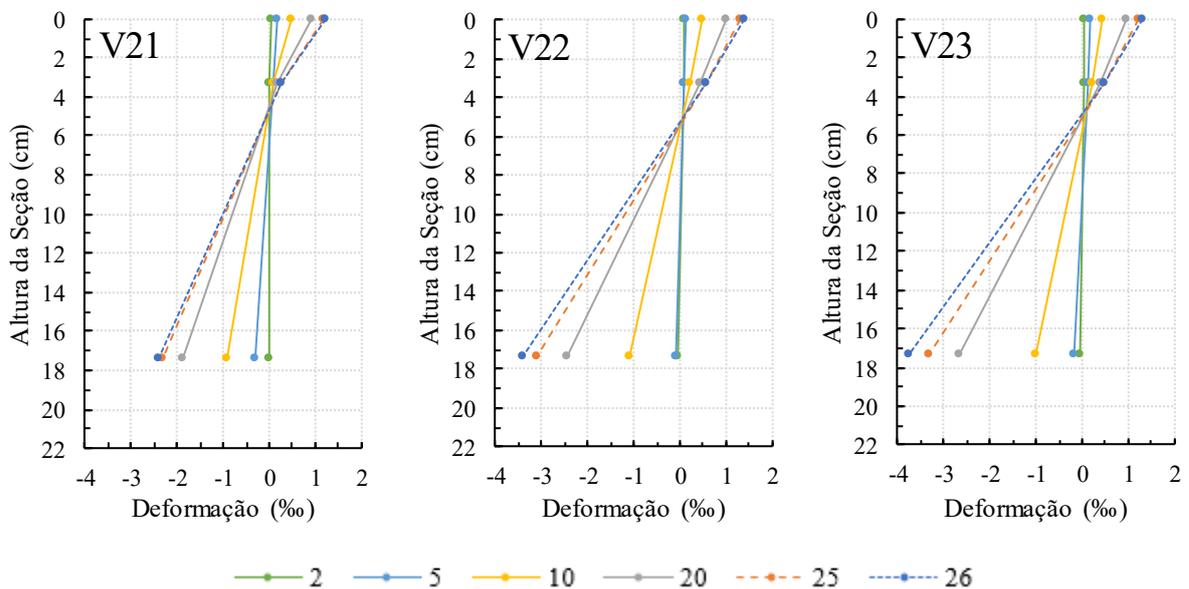
As deformações das seções das vigas dos lotes L1, L2 e L3 estão mostradas na Figura 53, na Figura 54 e na Figura 55, respectivamente. Estão apresentadas as deformações medidas pelos extensômetros em diferentes valores do momento fletor, indicados nas respectivas legendas.

Figura 53 – Deformação das seções das vigas do lote L1 em diferentes momentos fletores (indicados na legenda, em kNm).



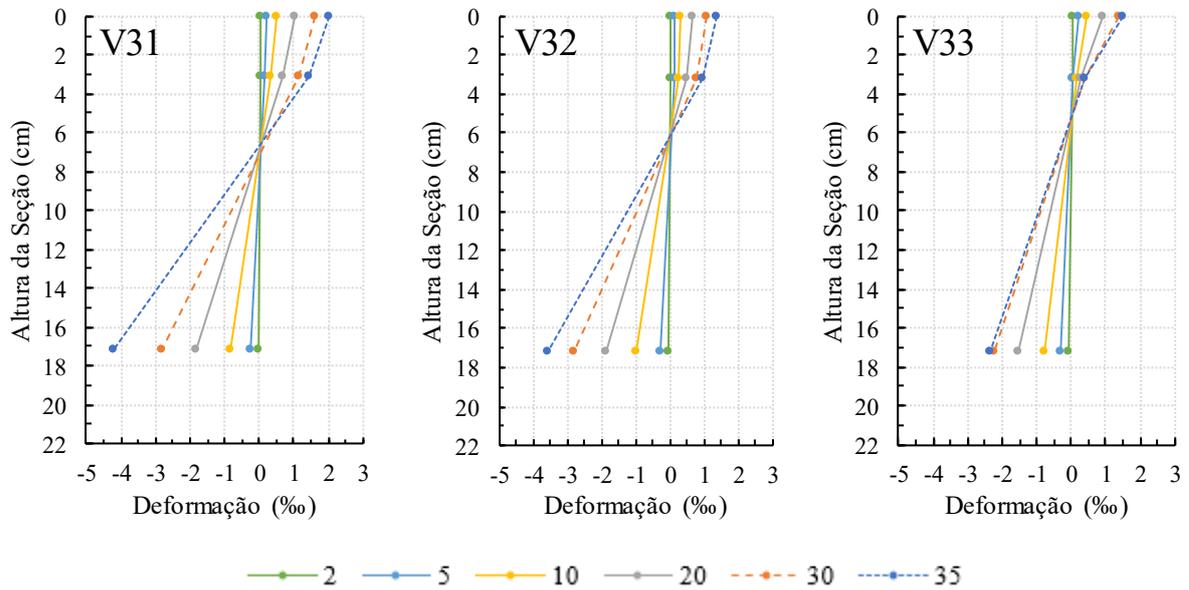
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 54 – Deformação das seções das vigas do lote L2 em diferentes momentos fletores (indicados na legenda, em kNm).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 55 – Deformação das seções das vigas do lote L3 em diferentes momentos fletores (indicados na legenda, em kNm).

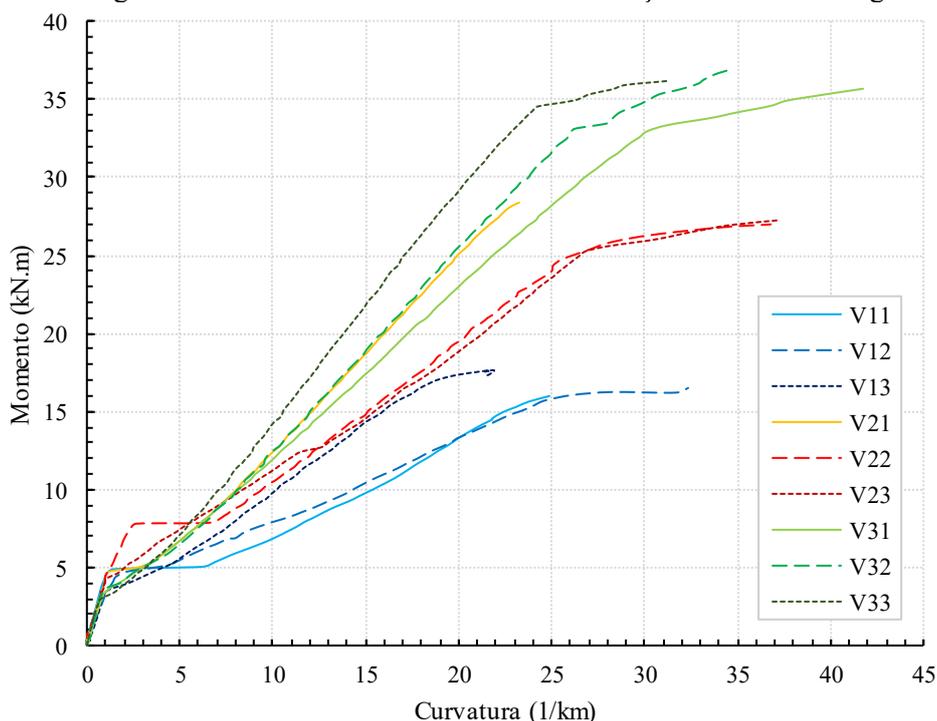


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

6.3.6 Curvatura

Nas vigas do lote L1, o cálculo das curvaturas das seções centrais considerou somente os dados de deformações da armadura porta-estribo e da armadura longitudinal de flexão (como mencionado anteriormente, houve problemas na aquisição dos dados de deformação do concreto nas vigas do lote L1). Já as curvaturas das seções centrais das vigas dos lotes L2 e L3 foram calculadas a partir dos três pontos de deformação, como demonstrado na Figura 54 e na Figura 55. O gráfico momento-curvatura das seções das nove vigas está apresentado na Figura 56.

Figura 56 – Gráfico momento-curvatura das seções centrais das vigas.



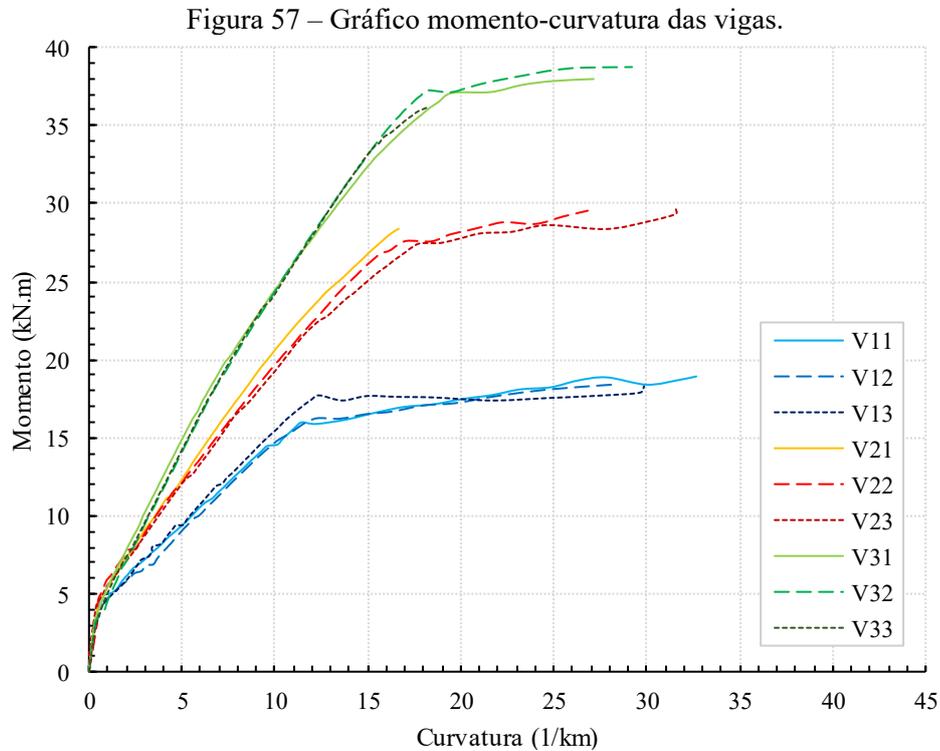
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Primeiramente, nota-se que os diagramas momento-curvatura apresentados se comportaram segundo o modelo teórico descrito na Figura 27, sendo possível identificar os diferentes estádios de comportamento das seções. Além disso, é possível observar que os carregamentos referentes ao início de fissuração também estão de acordo com os observados nos gráficos de deslocamento e deformação.

Embora seja perceptível a diferença das rigidezes entre os lotes (diferentes inclinações das curvas momento-curvatura), no lote L1, a viga V13 apresentou uma rigidez superior às demais vigas do lote, se semelhando às vigas do lote L2. Da mesma forma, a rigidez da viga V21 (lote L2) se aproximou das vigas do lote L3, que apresentaram os maiores valores de rigidez.

Salienta-se que as curvaturas apresentadas e, conseqüentemente, as rigidezes são referentes às seções centrais das vigas, calculadas a partir dos dados de deformação medidos pelos extensômetros instalados nestas seções. Admitindo que as deformações medidas são suscetíveis a condições locais aleatórias da região onde os extensômetros foram instalados (por exemplo, a abertura de uma fissura passando pelo extensômetro instalado na armadura de flexão), a variabilidade entre os comportamentos das curvaturas das seções de um mesmo lote é justificada.

Considerando o comportamento mais geral da estrutura, a Figura 57 traz o gráfico momento-curvatura das vigas dos três lotes, com valores de curvatura calculados pela Equação (27).

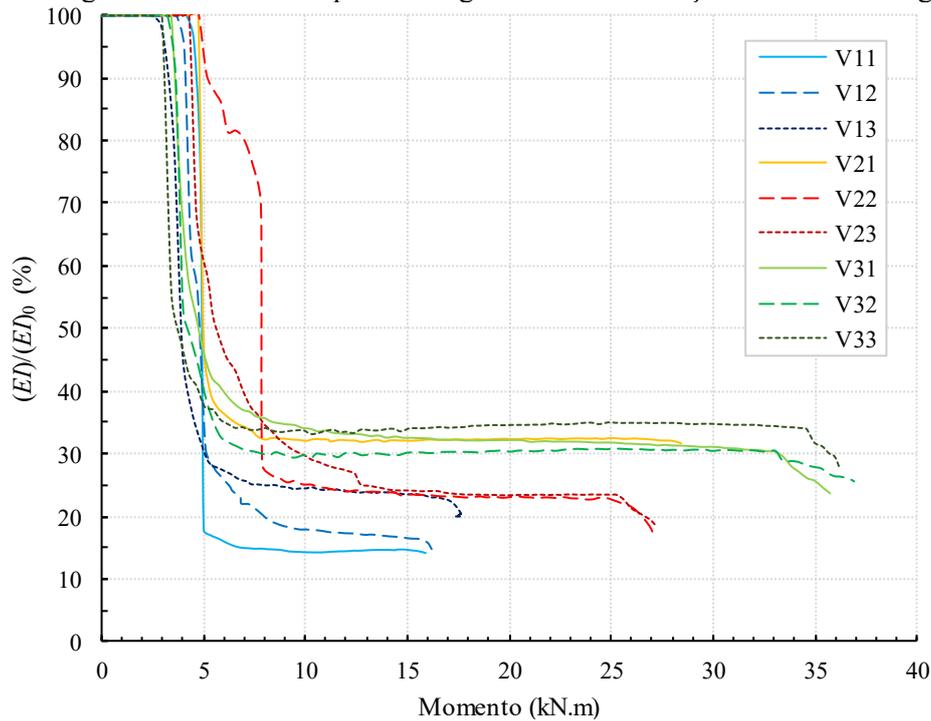


As curvaturas obtidas a partir da flecha exibiram um comportamento mais homogêneo entre as vigas de um mesmo lote, sendo notável a diferença das rigidezes de um lote para o outro. As vigas do lote L1 apresentaram as menores rigidezes (menores inclinações das curvas), enquanto as maiores rigidezes foram identificadas nas vigas do lote L3 (maior inclinação)

6.3.7 Perda de rigidez

As perdas de rigidezes calculadas a partir das curvaturas das seções centrais das vigas (Figura 56) estão apresentadas, em função do momento fletor, na Figura 58.

Figura 58 – Gráfico da perda de rigidez efetiva das seções centrais das vigas.

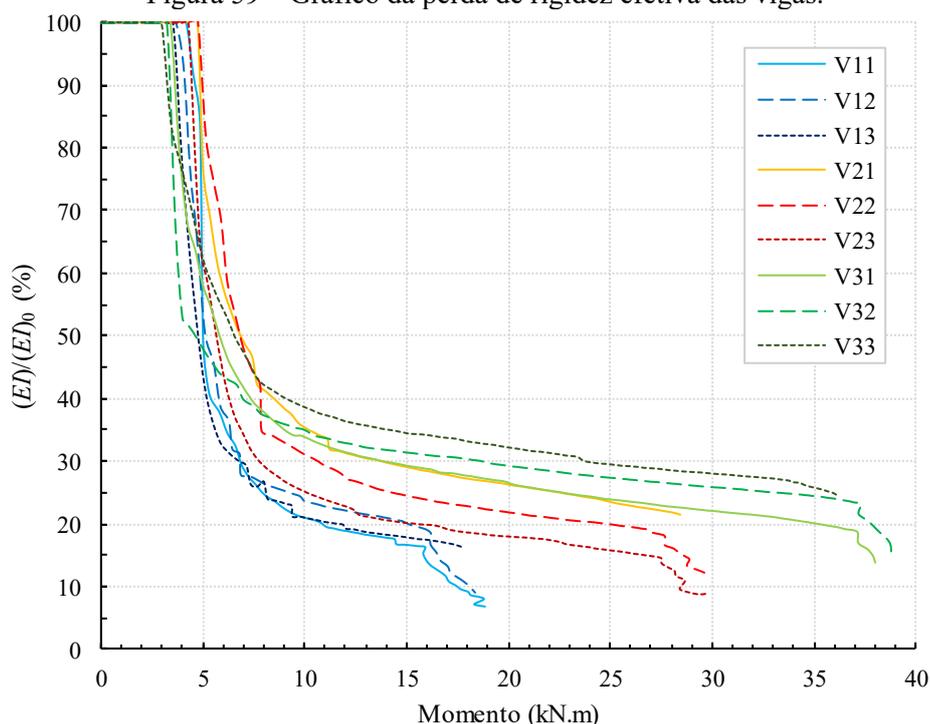


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Como já havia sido observado nos gráficos momento-curvatura das seções centrais das vigas (Figura 56), as vigas V13 e V21 apresentaram rigidezes finais maiores do que as demais vigas de seus respectivos lotes. Na maioria das vigas, as seções apresentaram uma queda brusca da rigidez com o início da fissuração (momento fletor entre 3 e 5 kNm), e, aproximadamente a partir do momento fletor de 10 kNm, a rigidez se manteve praticamente constante, mesmo com o aumento progressivo do carregamento. Entre as vigas do lote L1, a rigidez final média ficou em torno de 18% da rigidez inicial, enquanto nos lotes L2 e L3 as rigidezes finais médias foram cerca de 26% e 32% das rigidezes iniciais, respectivamente.

Na Figura 59, a seguir, está contido o gráfico da perda de rigidez das vigas calculada a partir das relações momento-curvatura apresentadas na Figura 57, determinadas em função das flechas.

Figura 59 – Gráfico da perda de rigidez efetiva das vigas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

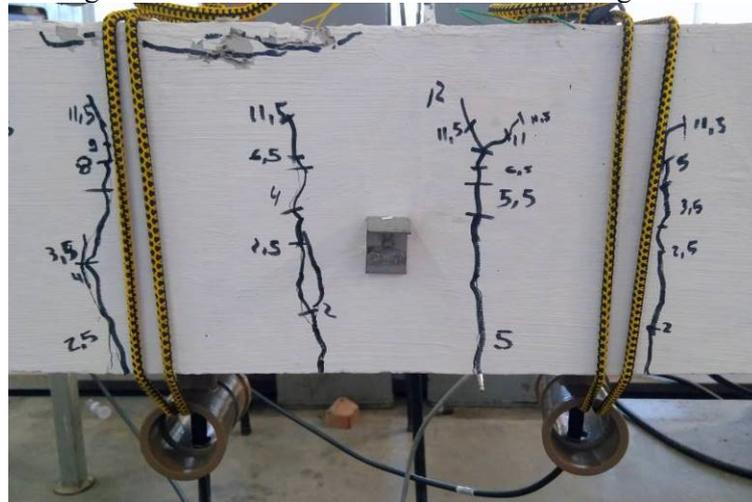
Assim como foi observado na Figura 58, nota-se que houve uma diminuição acentuada da rigidez das vigas em função do início do processo de fissuração. No entanto, diferentemente do comportamento da rigidez medida nas seções centrais, ao se considerar as vigas de uma forma mais geral, como é o caso da Figura 59, a perda de rigidez ocorre de forma gradual com o aumento do carregamento, até a ruptura.

Como previsto, a utilização de taxas de armaduras diferentes resultou em diferentes padrões de perda de rigidez, em ambos os casos. O decaimento da rigidez e a porcentagem da rigidez final das vigas em relação à inicial variou em função da taxa de armadura adotada, sendo essa a única variável diferente entre os lotes. Nos casos apresentados na Figura 59, considerando instantes próximo à ruptura, as vigas do lote L1 haviam perdido, em média, 82% de sua rigidez no momento fletor igual a 16 kNm; no lote L2, considerando o momento fletor de 25 kNm, a perda de rigidez média foi 80%; já no lote L3, houve uma perda de rigidez de 76%, em média, até o momento fletor de 33 kNm.

6.4 ENSAIO DE ULTRASSOM

O ensaio de ultrassom foi feito simultaneamente ao ensaio de flexão, com o objetivo de identificar alterações no formato de onda devido a mudanças internas causadas pelo processo de fissuração, possibilitando a posterior correlação entre os parâmetros de difusão obtidos e a perda de rigidez das vigas. Apesar de todas as vigas terem apresentado muitas fissuras, só foi avaliado o efeito das fissuras que apareceram aleatoriamente entre os transdutores de ultrassom, ou seja, as fissuras que apareceram nos 30 cm centrais das vigas (Figura 60). Ressalta-se que não foi feita a indução das fissuras, pois o objetivo era avaliar o processo espontâneo de fissuração e, conseqüentemente, de perda de rigidez.

Figura 60 – Fissuras entre os transdutores na viga V23.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

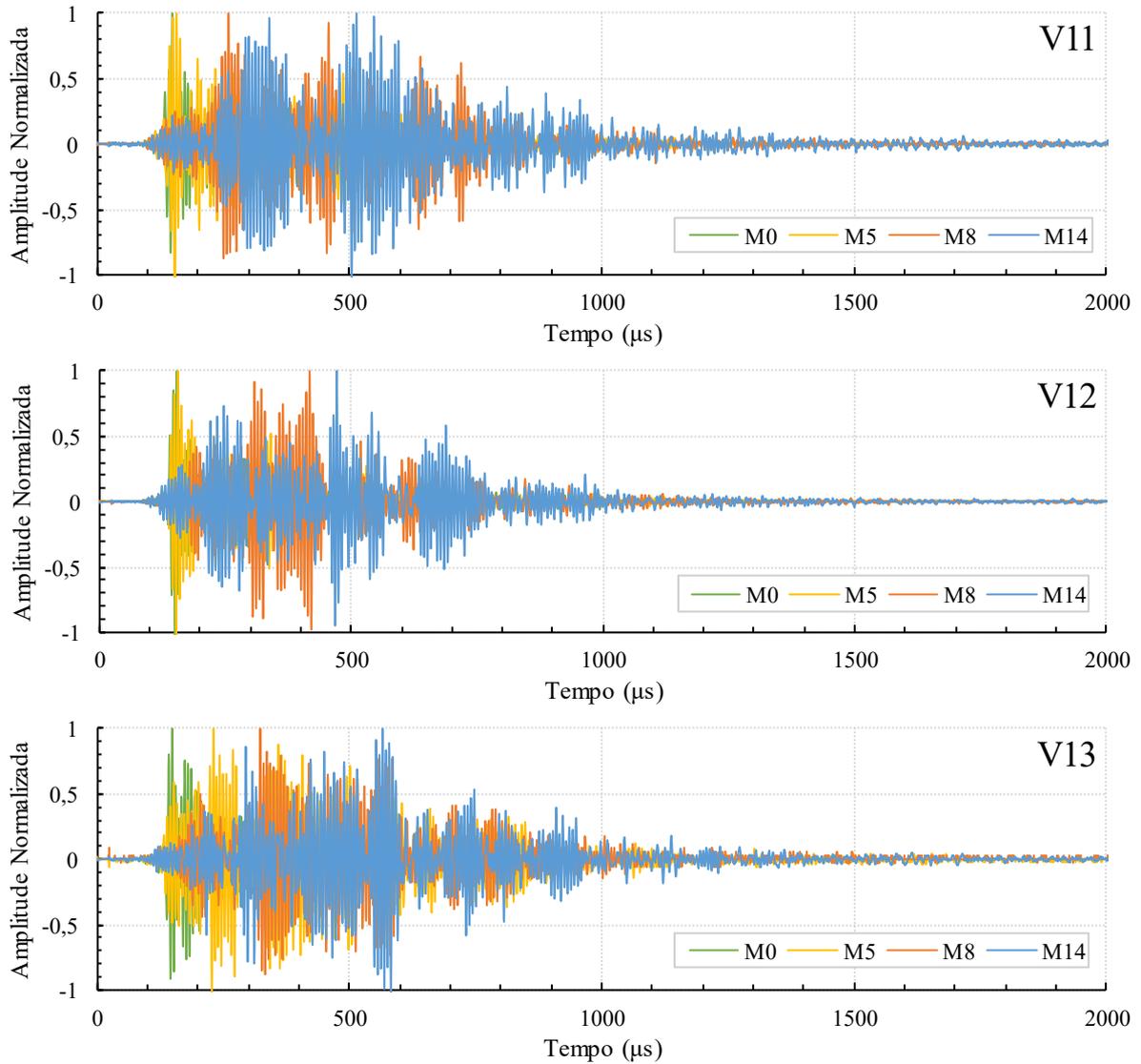
6.4.1 Formato de onda

Para ilustrar o comportamento das leituras de ultrassom durante os ensaios de flexão, exemplos de formatos de onda dos lotes L1, L2 e L3 estão mostrados na Figura 61, na Figura 62 e na Figura 63, respectivamente. Foram escolhidos sinais de diferentes instantes do ensaio de flexão, identificados nas figuras pelo valor do momento fletor máximo das vigas naquele instante, em kNm. Os momentos fletores escolhidos são referentes à primeira leitura de ultrassom (viga livre de carregamento), ao aparecimento das primeiras fissuras (início do estágio II), à estabilização da fissuração e ao início do regime plástico (estádio III).

Uma vez que foram usados diferentes ganhos no decorrer do ensaio, as amplitudes dos sinais ultrassônicos apresentados abaixo foram normalizadas para permitir uma melhor

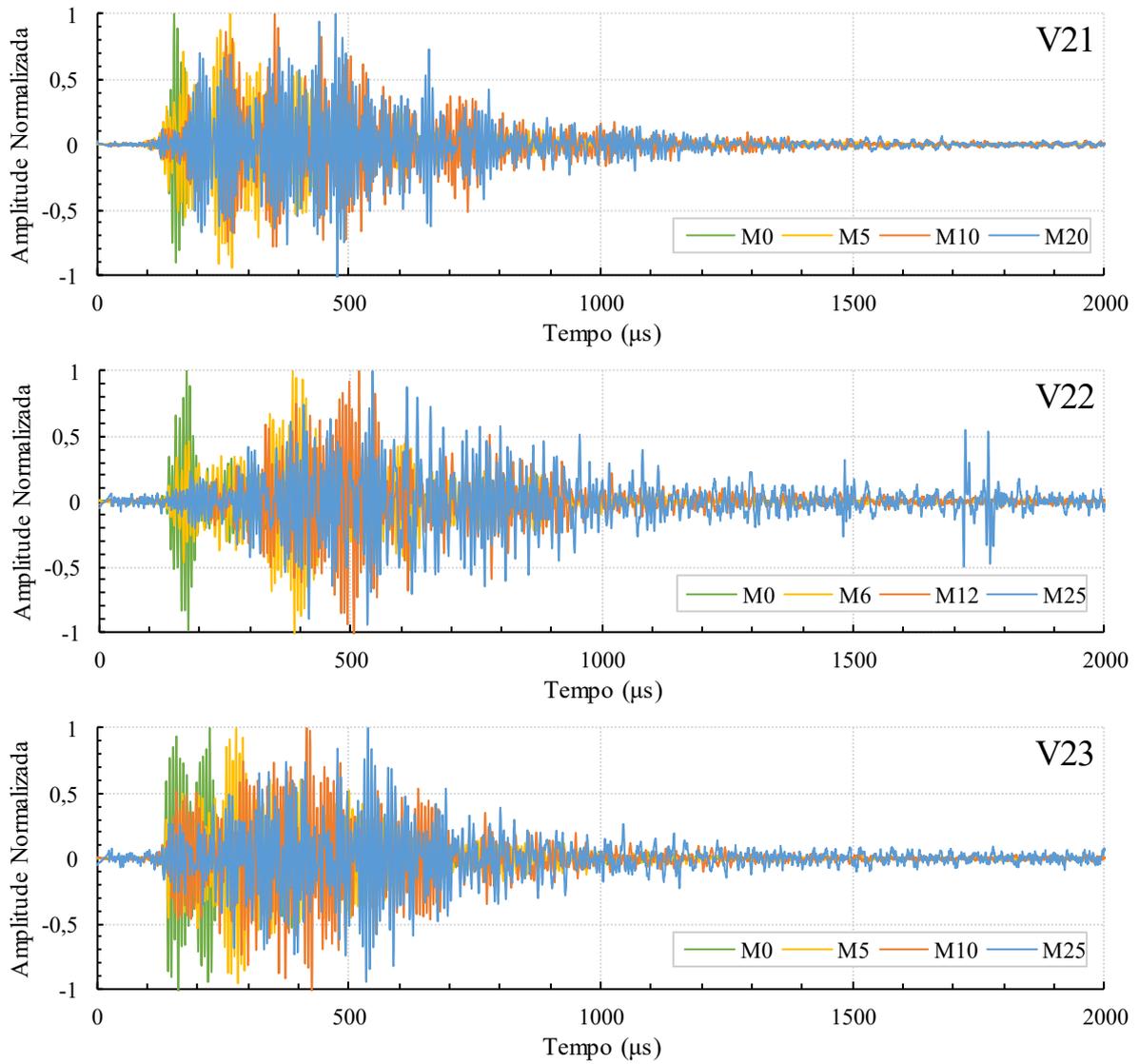
comparação entre os formatos de onda. Os formatos de onda sobrepostos apresentados a seguir estão mostrados de forma individual no Apêndice B.

Figura 61 – Sinais ultrassônicos obtidos durante os ensaios nas vigas do lote L1.



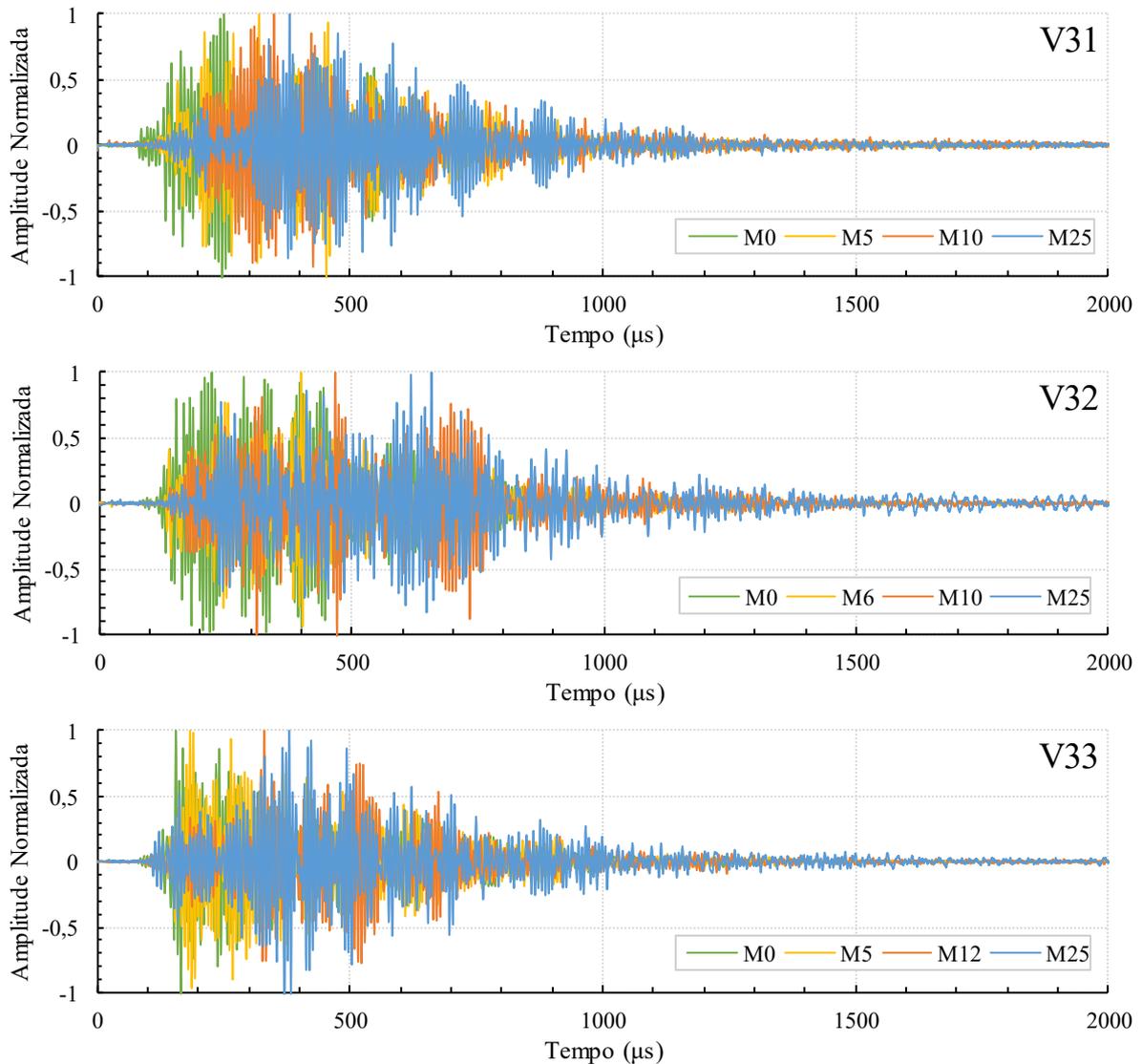
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 62 – Sinais ultrassônicos obtidos durante os ensaios nas vigas do lote L2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 63 – Sinais ultrassônicos obtidos durante os ensaios nas vigas do lote L3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A partir dos formatos de onda apresentados, observa-se que houve um atraso na chegada das ondas devido ao processo de fissuração, o que causou um “espalhamento” do formato de onda. Esse espalhamento se deve à chegada tardia de um número cada vez maior de ondas *codas*, com amplitude também maiores. Além disso, o tempo de chegada das amplitudes máximas também sofreu um atraso em relação ao formato obtido na condição sã, mostrando que o desenvolvimento da energia ocorreu de uma forma mais tardia. Tal observação demonstra o potencial da utilização do ultrassom na avaliação da rigidez das vigas, uma vez que o formato de onda foi sensível ao aparecimento e propagação das fissuras.

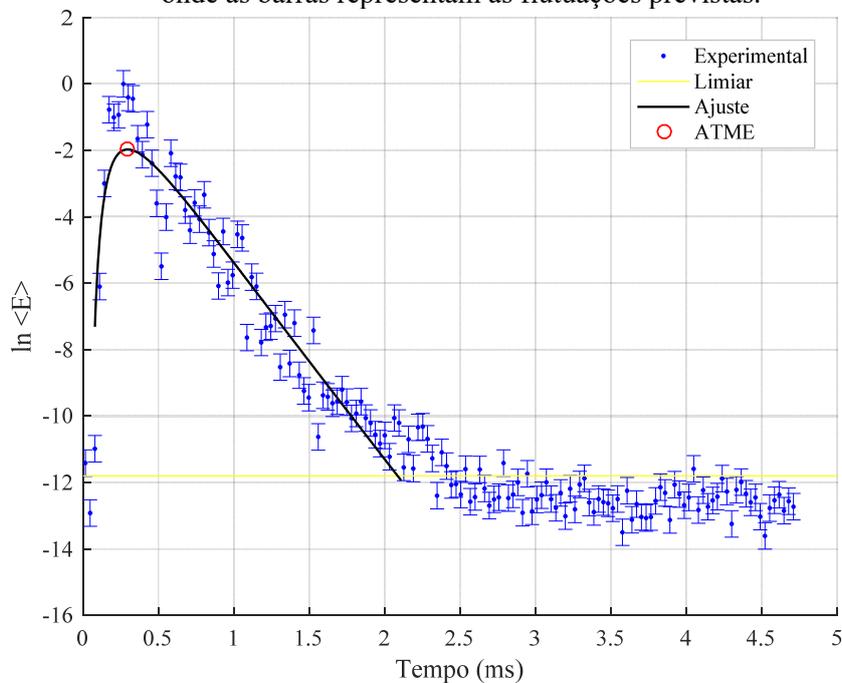
O ganho de amplificação do sinal utilizado nas primeiras leituras (estado livre de carregamento) variou entre 10x e 50x. No decorrer do ensaio, o ganho foi ajustado à medida

que o processo de formação e de propagação de fissuras intensificava os fenômenos de dispersão e de absorção das ondas, causando uma maior atenuação do pulso ultrassônico e, conseqüentemente, a perda de amplitude do sinal. No estado mais crítico de fissuração, o ganho chegou a 1000x em algumas vigas. Um quadro com os valores de ganho utilizados durante os ensaios está mostrado no Apêndice C.

6.4.2 Processamento de sinais

O processamento dos formatos de onda foi feito por rotinas de MATLAB, o que inclui a determinação da densidade espectral de energia experimental, o cálculo do limiar de energia do ruído e o ajuste dos dados experimentais com a solução analítica tridimensional considerando um domínio infinito, resultando nos parâmetros de difusão. Um exemplo de ajuste entre os dados experimentais obtidos pela análise tempo-frequência e a solução analítica considerada está apresentado na Figura 64, onde as barras de erro representam as flutuações esperadas, obtidas pela Equação (24). Os dados são referentes a uma leitura de ultrassom realizada durante o ensaio de flexão da viga V33.

Figura 64 – Aproximação da densidade espectral de energia experimental com a solução 3D infinita, onde as barras representam as flutuações previstas.



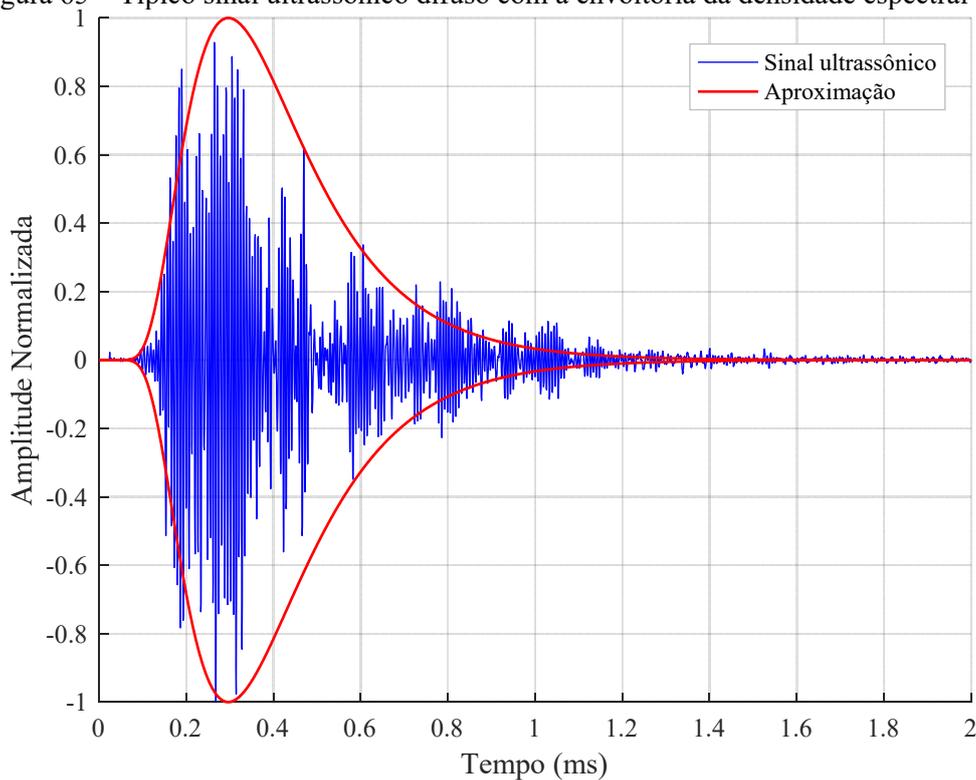
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

É possível observar que o ajuste entre as curvas foi feito somente no intervalo com valores de energia acima do limiar do ruído (representado pela linha amarela na Figura 64).

Considerando os valores de Δt e de Δf adotados (32 μ s e 400 kHz, respectivamente), as flutuações representadas pelas barras de erro são de 39,8% – valor que considera o fator de normalização $\alpha = 0,4922$, referente à utilização da janela de Hann. Nota-se que essas flutuações se encaixam aleatoriamente acima e abaixo da curva, o que sugere uma boa qualidade do ajuste. A figura mostra ainda o ponto de energia máxima (indicado pelo círculo vermelho), considerada para o cálculo do ATME.

Um sinal ultrassônico típico está mostrado na Figura 65, a partir do qual foram gerados os dados experimentais (mostrados na Figura 64) e a curva da densidade espectral de energia obtida a partir dos parâmetros D , σ e P_0 recuperados da aproximação, também representada na Figura 65. Ambas as curvas presentes nesta figura foram normalizadas para uma melhor visualização da envoltória.

Figura 65 – Típico sinal ultrassônico difuso com a envoltória da densidade espectral de energia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Ressalta-se que a utilização de ganhos de amplificação diferentes durante os ensaios de ultrassom não interferiu no valor dos parâmetros de difusão obtidos por meio do método de aproximação descrito.

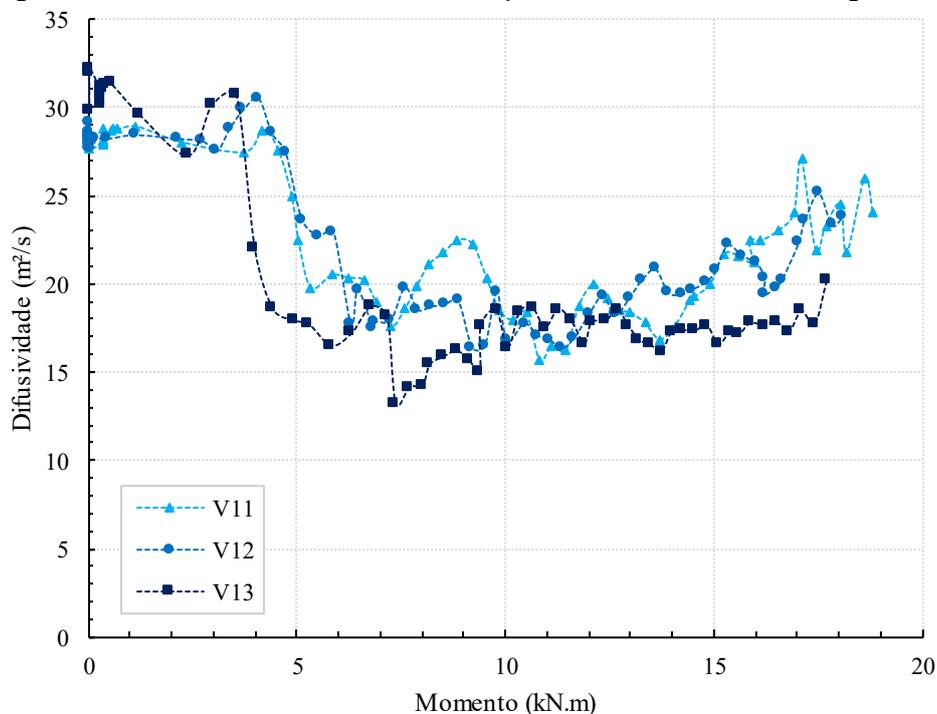
6.4.3 Parâmetros de difusão

Os parâmetros de difusão foram recuperados de todos os sinais obtidos durante o ensaio de flexão. As análises referentes aos dados obtidos no ensaio de ultrassom foram realizadas de forma comparativa entre as três vigas de cada lote. Foram analisados os parâmetros difusividade, dissipação, P_0 e ATME. O ATME foi o parâmetro que menos apresentou desvios em relação à média de cada leitura. A seguir, são apresentados o comportamento desses parâmetros no decorrer dos ensaios de flexão, do instante inicial (sem carregamento) até o momento de ruptura das vigas.

6.4.3.1 Difusividade

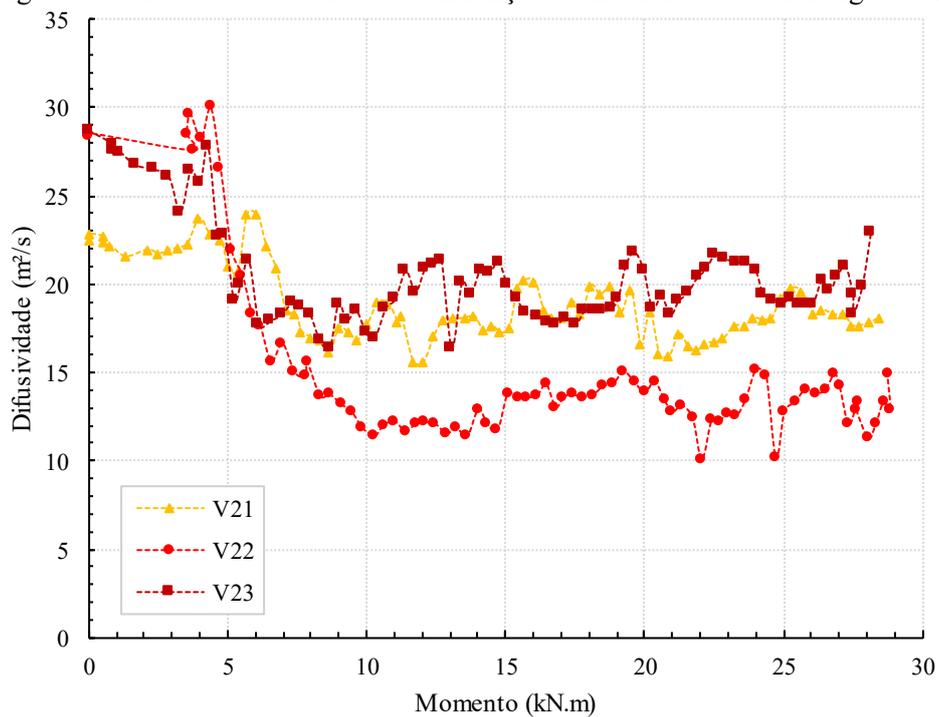
O primeiro parâmetro analisado foi a difusividade. O comportamento da difusividade em função do momento fletor atuante nas vigas dos lotes L1, L2 e L3 está apresentado na Figura 66, na Figura 67 e na Figura 68, respectivamente.

Figura 66 – Gráfico da difusividade em função do momento fletor das vigas do lote L1.



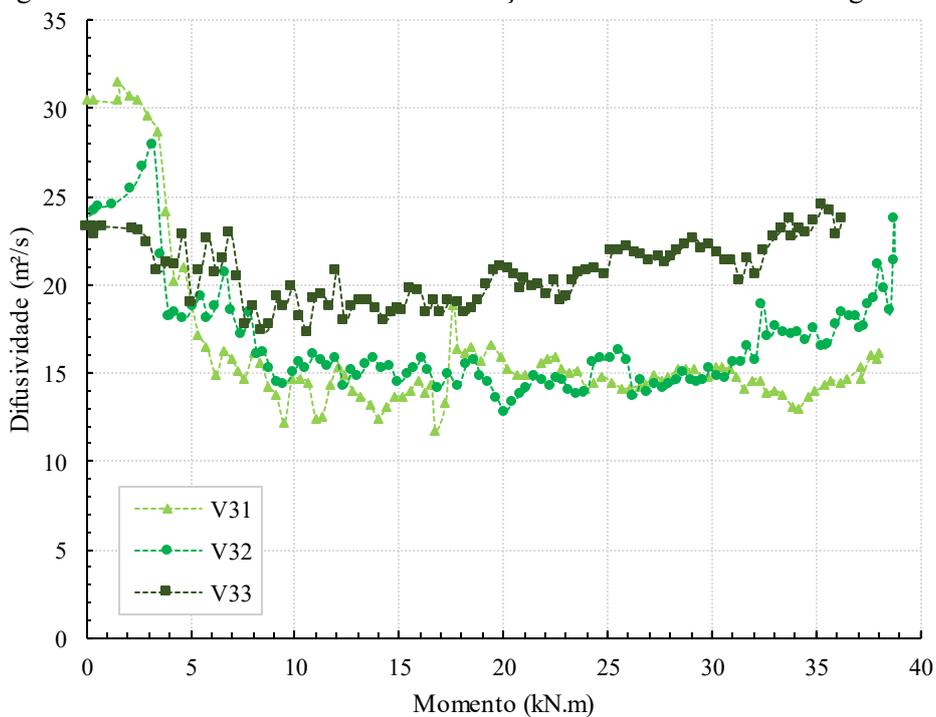
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 67 – Gráfico da difusividade em função do momento fletor das vigas do lote L2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

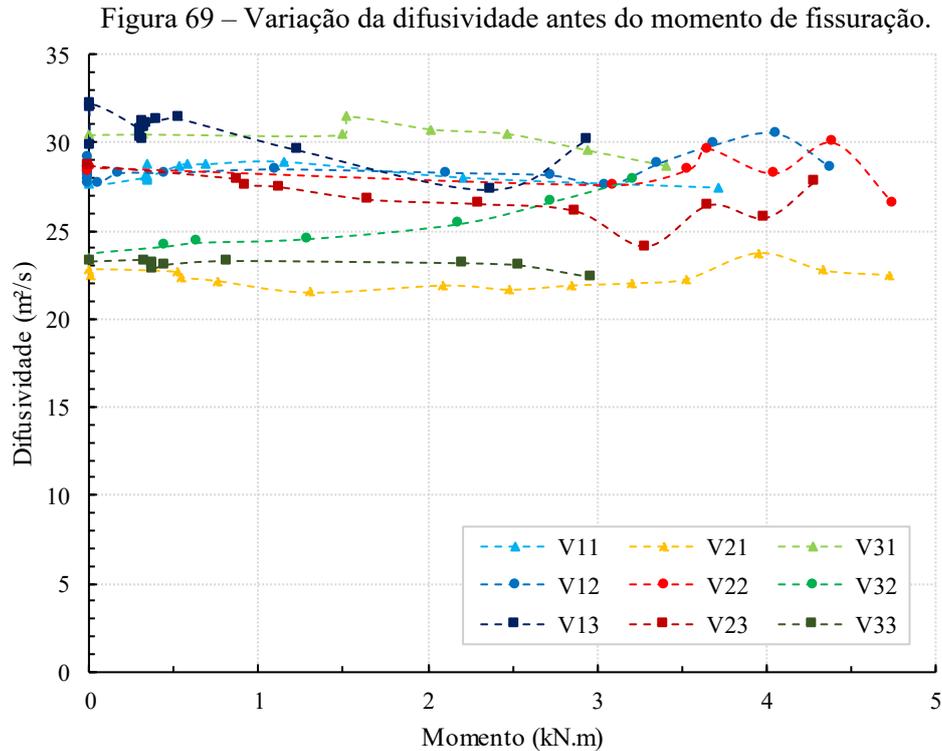
Figura 68 – Gráfico da difusividade em função do momento fletor das vigas do lote L3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

De forma geral, a difusividade se comportou conforme o esperado. Na primeira parte dos gráficos, antes do momento de fissuração (em torno de 5 kNm), a difusividade apresentou

pouca variação e se manteve próxima dos valores iniciais (intervalo mostrado na Figura 69). Com o aparecimento e a progressão das fissuras, houve uma maior dispersão da energia ultrassônica e atraso da difusão, ou seja, a intensidade ultrassônica passou a ser transmitida de forma mais lenta através do material, resultando em valores mais baixos de difusividade.



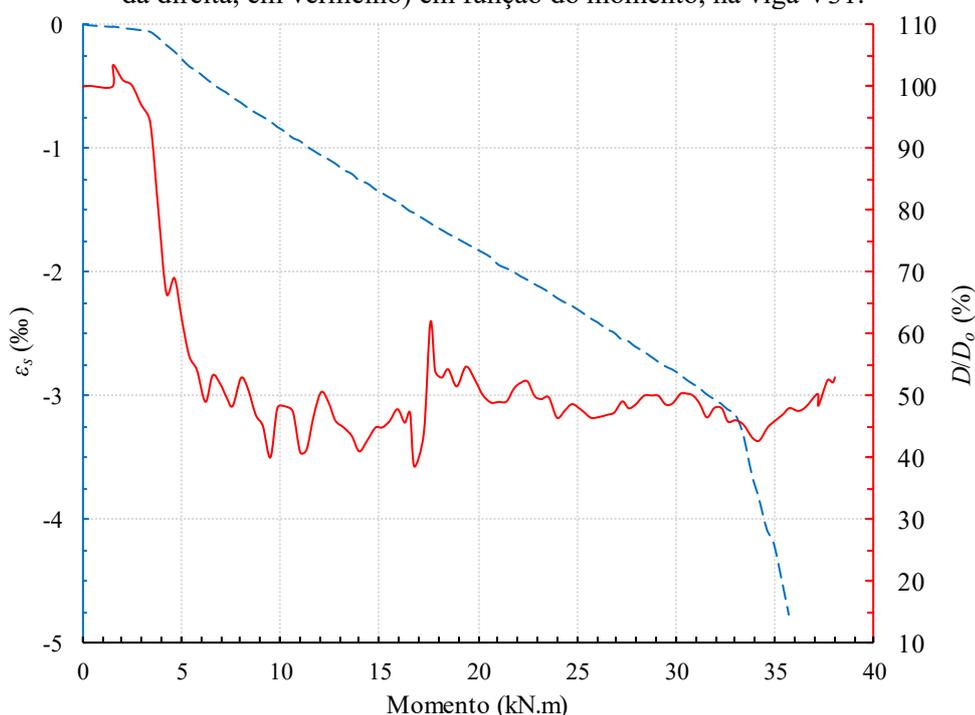
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A variação média da difusividade no intervalo entre o início do ensaio e o momento de fissuração foi de 3,2%, sendo que a maior variação se deu na viga V32, cuja difusividade apresentou coeficiente de variação de 6,0%. Além da variabilidade intrínseca dos ensaios experimentais, presume-se que essas variações ocorreram devido ao rearranjo interno da microestrutura das vigas, ocasionado pela introdução do carregamento. Possivelmente, essa reestruturação fez com que houvesse mudanças na transmissão da energia através do meio (comparado com o estado inicial, livre de carregamento), produzindo variações, mesmo que pequenas, nos valores da difusividade. Esse suposto comportamento está relacionado ao fenômeno de acustoelasticidade, que recentemente foi constatado ser influente no processo de difusão de ondas ultrassônicas (ZHANG et al., 2016; LAROSE et al., 2017) e nos valores da difusividade (ZHAN; JIANG; JIANG, 2019).

Posteriormente, próximo do valor de momento fletor de 5 kNm, houve uma queda significativa dos valores de difusividade. Esse ponto de declive coincide com o momento de

fissuração das vigas, mostrando que foi possível identificar o início da fissuração a partir dos dados de difusividade. Na Figura 70 está apresentado um gráfico comparativo entre o decaimento da difusividade (D/D_0) e a deformação do aço da viga V31, ambos em função do momento fletor. Foi utilizado como difusividade inicial, D_0 , a média entre os valores recuperados das duas primeiras leituras do ultrassom, realizadas antes do início da aplicação da carga.

Figura 70 – Comparação entre a deformação do aço (eixo da esquerda, em azul) e a difusividade (eixo da direita, em vermelho) em função do momento, na viga V31.



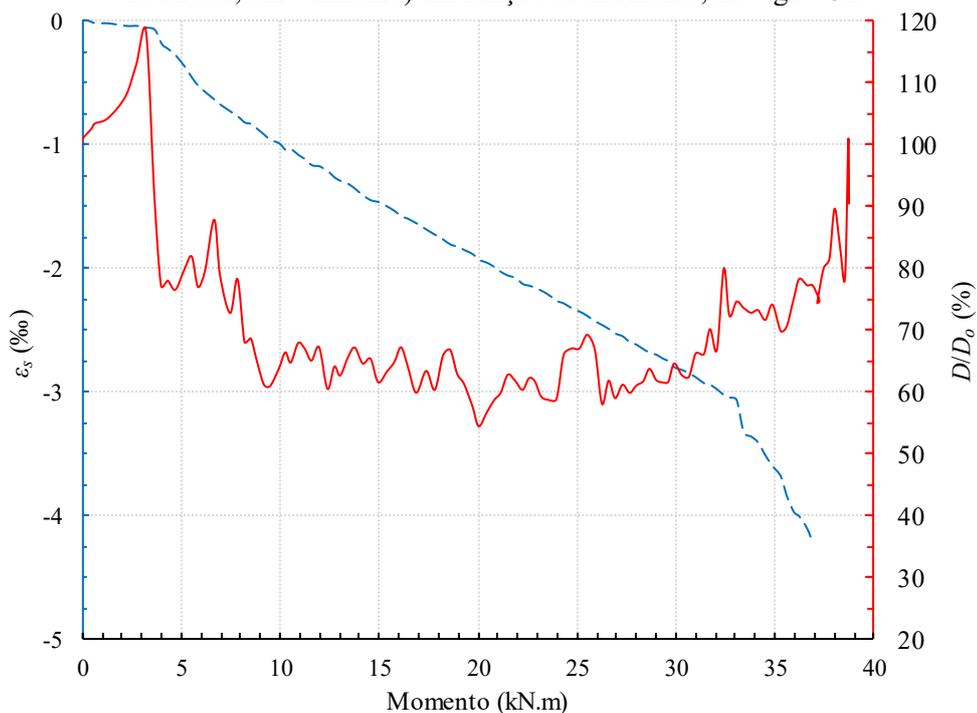
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Na figura acima, é possível identificar o ponto de início da fissuração pela mudança de inclinação da curva de deformação do aço, próximo ao valor de momento fletor de 4 kNm. Nesse mesmo instante, nota-se uma diminuição brusca dos valores de difusividade, evidenciando que esse parâmetro é sensível na identificação do início da fissuração.

A partir dessa queda brusca, mesmo com oscilações, a difusividade apresentou um comportamento médio constante. Em algumas vigas, nota-se que os valores continuaram diminuindo, mesmo com uma taxa de declínio bem menor. Acredita-se que isso tenha ocorrido devido à progressão das fissuras sitas entre os transdutores, fazendo com que as ondas fossem mais dispersas no caminho de propagação.

Por fim, mais próximo do momento de ruptura, observou-se uma inversão do comportamento da difusividade, que apresentou uma tendência de aumento. Novamente, comparando a curva de decaimento da difusividade e a de deformação do aço em função do momento fletor, notou-se que essa inversão de comportamento da difusividade se dá próximo da deformação de escoamento do aço, como mostrado na Figura 71. Essa figura é referente aos dados da viga V32 e nela o comportamento citado acontece de forma acentuada, sendo que o escoamento do aço ocorreu logo acima da deformação de 3‰, para um momento fletor de 33 kNm, aproximadamente. Esse comportamento também pode ser notado, mesmo que de forma mais discreta, na Figura 70, referente à viga V31. Os gráficos comparativos entre a deformação do aço e a difusividade das demais vigas estão contidos no Apêndice D.

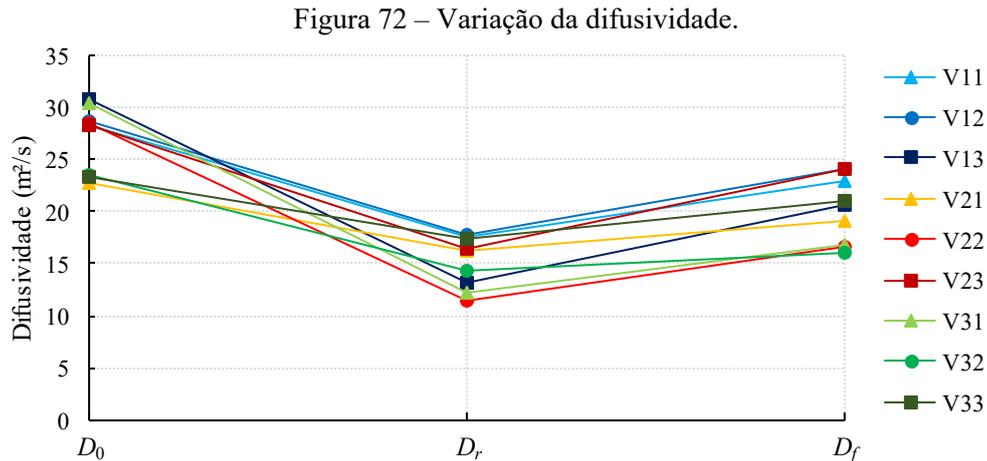
Figura 71 – Comparação entre a deformação do aço (eixo da esquerda, em azul) e a difusividade (eixo da direita, em vermelho) em função do momento, na viga V32.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Supõe-se que esse aumento relativo da difusividade ocorreu, pois para esse momento fletor, próximo do escoamento do aço, a viga já havia sofrido uma grande deformação e a profundidade das fissuras já estava elevada. Dessa forma, parte das ondas ultrassônicas, que até então estavam contornando a profundidade das fissuras, passou a se desviar pelas barras de aço da armadura, que se tornou um caminho de propagação mais “fácil”. Assim, a energia começou a ser transmitida mais rapidamente entre os transdutores, ocasionando em um aumento da difusividade.

Uma última observação pode ser feita em relação aos valores de difusividade medidos no início (antes do começo da aplicação da carga), durante (após o declínio que marcou o início da fissuração) e no final do ensaio de flexão (depois da retirada completa do carregamento). Essa variação da difusividade inicial (D_0), de fissuração (D_r) e final (D_f) das nove vigas está mostrada na Figura 72.



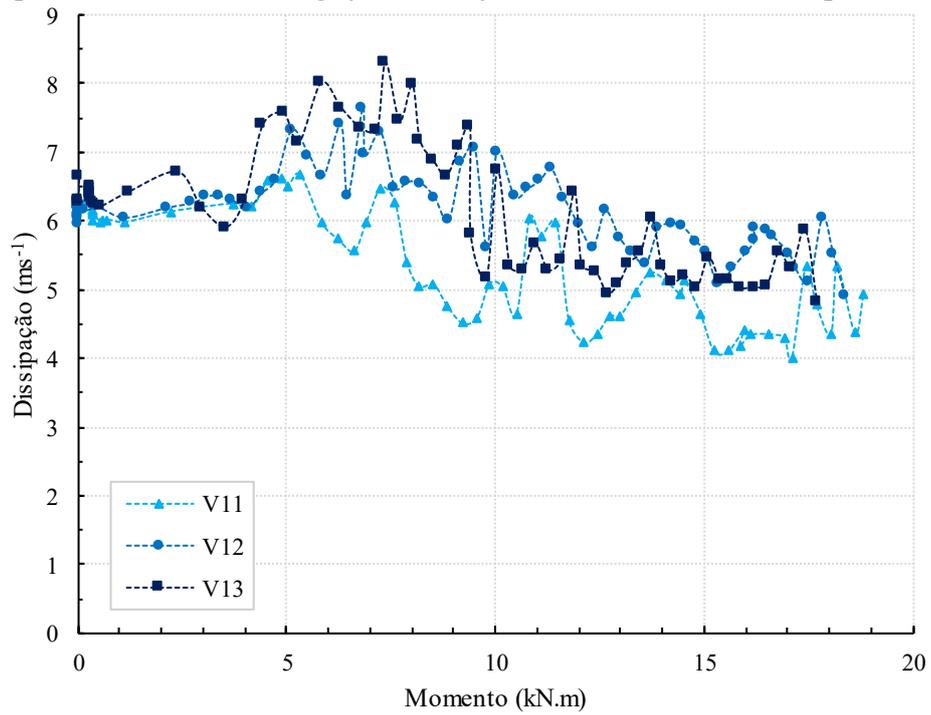
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A diminuição da difusividade devido ao início do processo de fissuração foi de aproximadamente 44% em relação à D_0 . Após a retirada completa do carregamento, houve uma recuperação no valor da difusividade de aproximadamente 33% em relação à D_r . Entretanto, o valor final, D_f , permanece cerca de 26% menor do que o valor inicial, D_0 . Esse comportamento mostra que, mesmo com a retirada total do carregamento e o fechamento aparente das fissuras, internamente elas não se fecham por completo, gerando alterações no caminho de propagação das ondas e, conseqüentemente, no valor da difusividade. Esse resultado corrobora os resultados observados por In (2013).

6.4.3.2 Dissipação

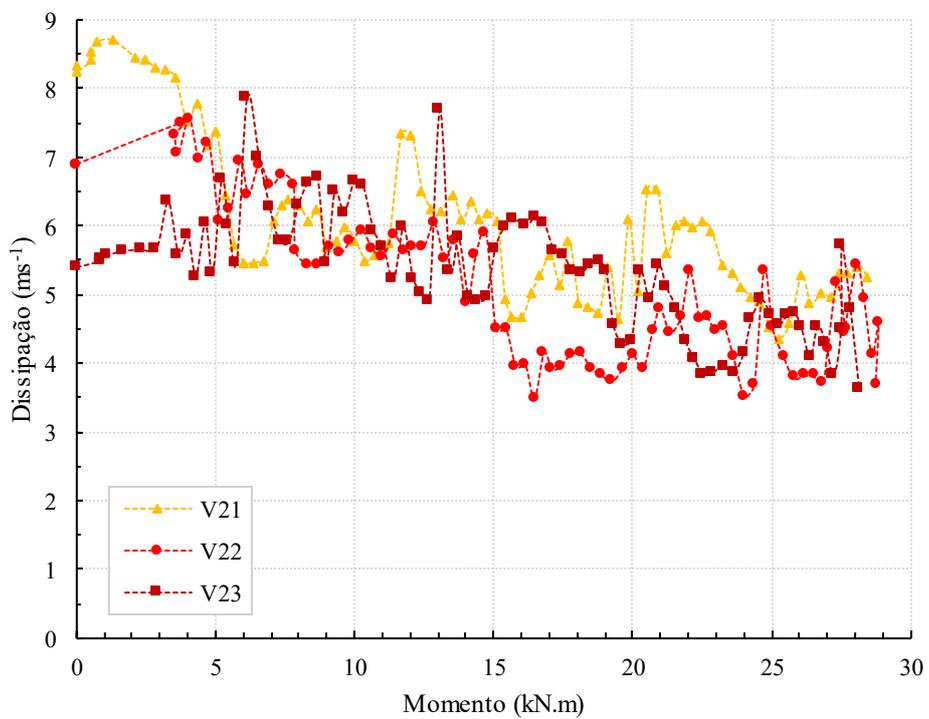
O comportamento da taxa de dissipação em função do momento fletor atuante nas vigas dos lotes L1, L2 e L3 está apresentado na Figura 73, na Figura 74 e na Figura 75, respectivamente.

Figura 73 – Gráfico da dissipação em função do momento fletor das vigas do lote L1.



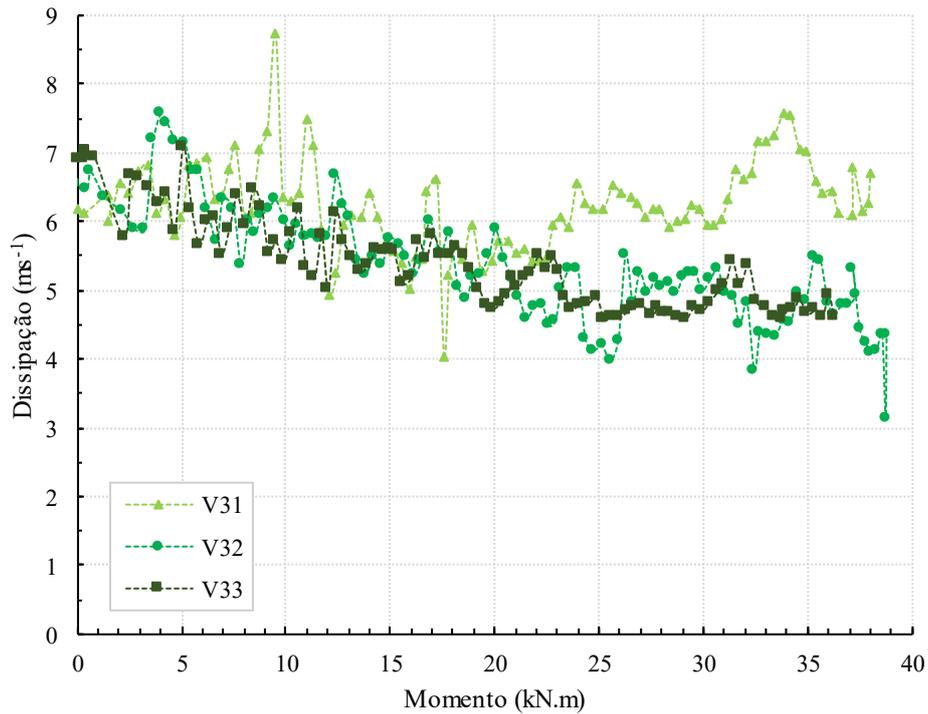
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 74 – Gráfico da dissipação em função do momento fletor das vigas do lote L2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

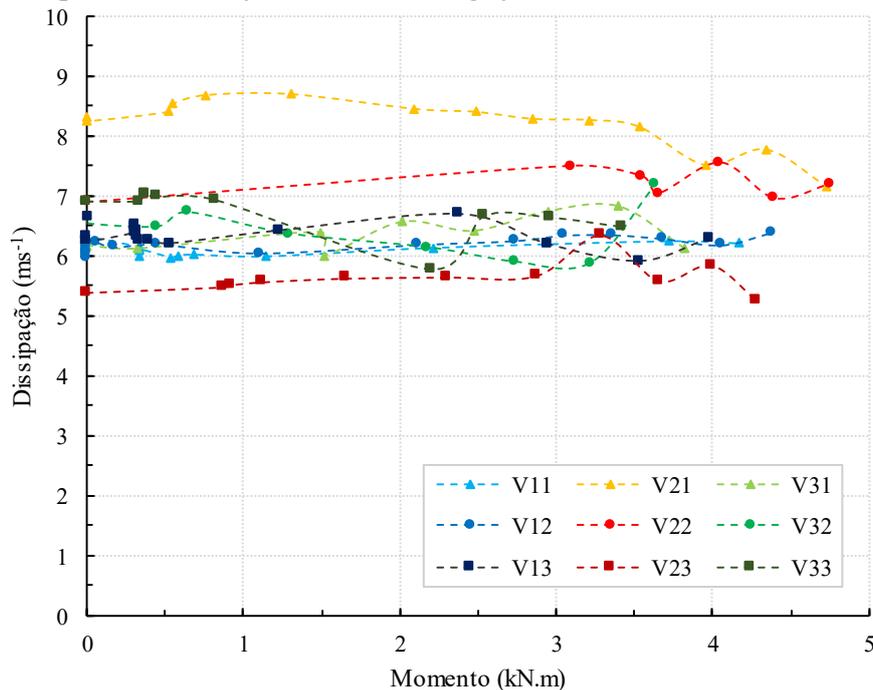
Figura 75 – Gráfico da dissipação em função do momento fletor das vigas do lote L3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Considerando que todas as vigas foram produzidas com os mesmos materiais e a partir do mesmo traço, e que foram utilizados os mesmos procedimentos de produção e de moldagem em todas as concretagens, era esperado que a taxa de dissipação fosse aproximadamente constante durante todo o ensaio (WEAVER; SACHSE, 1995; QUIVIGER et al., 2012), uma vez que esse parâmetro é representativo do meio e está relacionado a propriedades viscoelásticas do material. Tal comportamento foi verificado somente antes do início da fissuração, como é possível ver na Figura 76. Nesse intervalo, a variação média da dissipação foi de 3,9%, sendo que a maior variação ocorreu na viga V33, que apresentou coeficiente de variação de 5,6%. Essa baixa flutuação se justifica pelo fato de que, antes do início do surgimento de fissuras, as propriedades viscoelásticas se mantiveram as mesmas.

Figura 76 – Variação da taxa de dissipação antes do momento de fissuração.



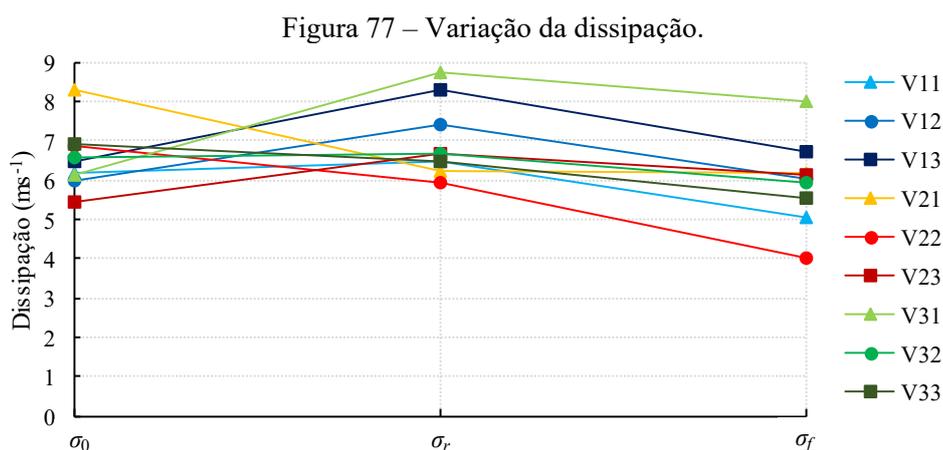
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tratando a dissipação como uma caracterização do meio e considerando que as propriedades viscoelásticas eram as mesmas nas nove vigas, é válida a comparação entre os valores iniciais deste parâmetro em cada uma delas. Na maioria das vigas, o valor da dissipação inicial (antes do início do carregamento) ficou entre 6 e 7 ms^{-1} , exceto nas vigas V21 e V23 (ambas do lote L2). A média dos valores iniciais da dissipação no lote L1 foi de 6,21 ms^{-1} (coeficiente de variação de 3,9%) e no lote L3 foi de 6,54 ms^{-1} (coeficiente de variação igual a 5,9%). Já no lote L2, a média foi de 6,87 ms^{-1} e o coeficiente de variação foi de 20,8%.

Próximo da carga de fissuração, os valores de dissipação começaram a mostrar uma maior oscilação e, a partir desse ponto, não há um padrão de comportamento muito bem definido, embora seja possível perceber uma tendência geral de declínio. Por se tratar de uma variável relacionada a mecanismos internos de perda de energia, essa variação arbitrária se justificaria na medida em que as alterações na microestrutura do material causadas pela fissuração se dão de forma aleatória. Ao mesmo tempo, o processo de formação e de propagação de fissuras segue um padrão bem definido (por exemplo, início da fissuração na região central do vão, da face tracionada em direção à face comprimida), o que explica a tendência comum de declínio da dissipação à medida que o momento fletor cresce.

Apesar de haver uma mudança de comportamento da dissipação com o início da formação de fissuras, a identificação do momento de fissuração usando este parâmetro não se mostrou viável e bem definida, como foi possível no caso da difusividade.

Na Figura 77 está mostrada uma comparação dos valores da dissipação no início do ensaio de flexão (σ_0), no instante após o momento de fissuração (σ_r) e no final, após a retirada do carregamento (σ_f).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

No gráfico mostrado na figura acima percebe-se que não há um padrão comportamental da dissipação após a ocorrência das fissuras: enquanto algumas vigas apresentam um aumento da dissipação, em outras ocorre uma diminuição. A partir desse ponto, houve uma queda de, em média, 15% dos valores de dissipação em relação aos obtidos após a fissuração, σ_r . Esse comportamento ratifica o mostrado anteriormente, no qual o comportamento da dissipação foi ocasional até próximo do momento de formação de fissuras e, em seguida, apresentou uma tendência de diminuição.

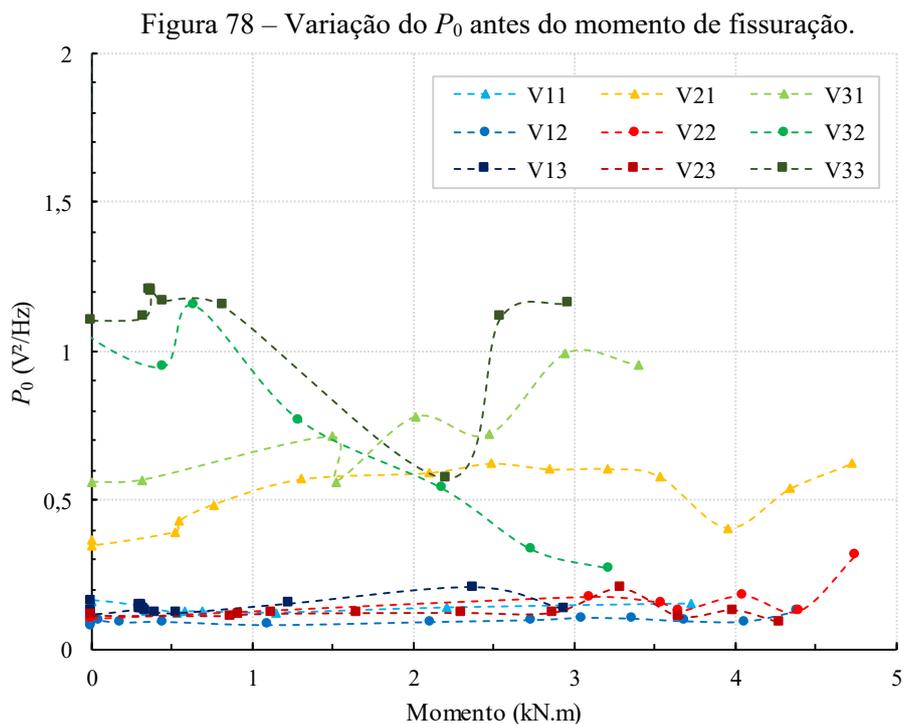
O coeficiente de variação da taxa de dissipação inicial, σ_0 , foi de 11,6%, ao passo que a taxa de dissipação na fissuração, σ_r , e no final, σ_f , tiveram coeficientes de variação de 12,9 e 17,3%, respectivamente. Esse crescimento gradual dos coeficientes de variação nos três instantes demonstram o aumento da aleatoriedade do processo que é descrito pela taxa de dissipação em função do momento fletor e, conseqüentemente, do surgimento e desenvolvimento de fissuras.

Na literatura foram constatadas diferentes tendências da dissipação a partir de um aumento do volume de dispersores: Deroo et al. (2010) não constataram uma tendência definida, Punurai et al. (2007) identificaram uma diminuição da dissipação com o aumento

dos vazios de ar e Ahn et al. (2019) obtiveram maiores taxas de dissipação em situações com mais danos. Essa diferença de comportamento verificada por diferentes autores pode estar relacionada com a magnitude da energia de entrada utilizada em cada pesquisa, o que influencia diretamente na quantidade de energia difusa das ondas que chega ao receptor tardiamente (o que determina a dissipação) (AHN et al., 2019). Os autores mencionados acima usaram diferentes magnitudes de energia de entrada e diferentes condições de simulação de dispersores, o que provavelmente resultou em diferentes quantidades e padrões de perda de energia. Além disso, o tipo de dano (por exemplo, tamanho e forma das fissuras simuladas) e a faixa de frequências dos transdutores foram bastante diferentes nos estudos revisados, de modo que comparações diretas não são significativas.

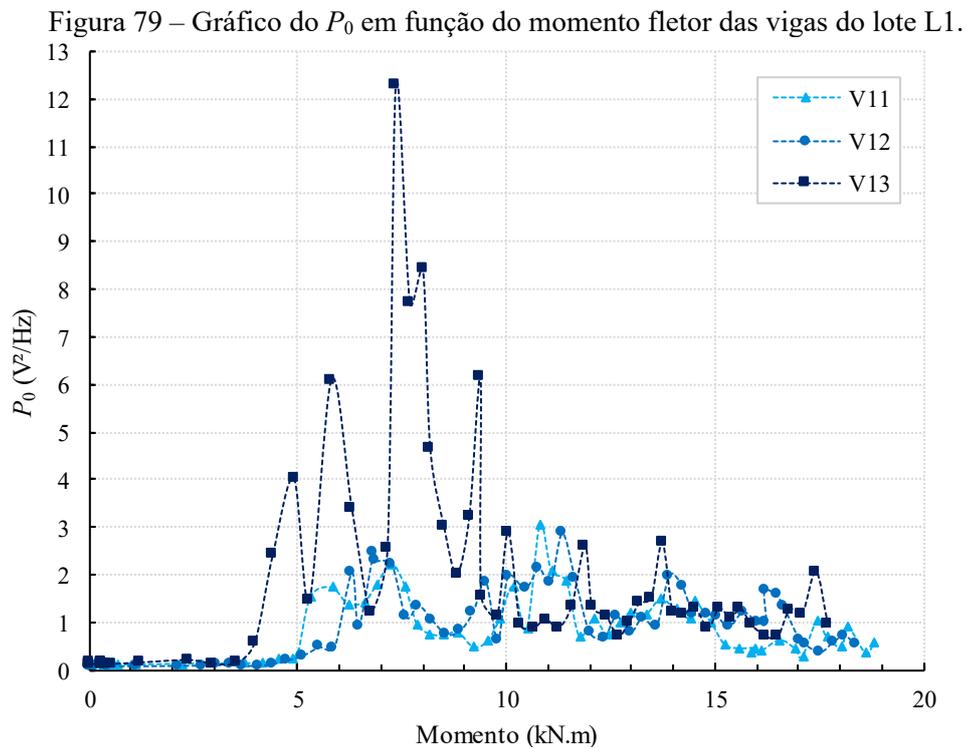
6.4.3.3 Fator P_0

O P_0 foi o parâmetro que mais apresentou variações, tanto individualmente, no decorrer do ensaio de uma mesma viga, quanto na comparação entre diferentes vigas. O intervalo que apresentou menores variações de P_0 , assim como aconteceu com a difusividade e com a dissipação, foi antes do início da fissuração, como mostrado na Figura 78. Ainda assim, o coeficiente de variação de P_0 nesse intervalo flutuou de 8,7%, obtido na viga V11, até 60,3%, na viga V32. A variação média foi de 24,8%.



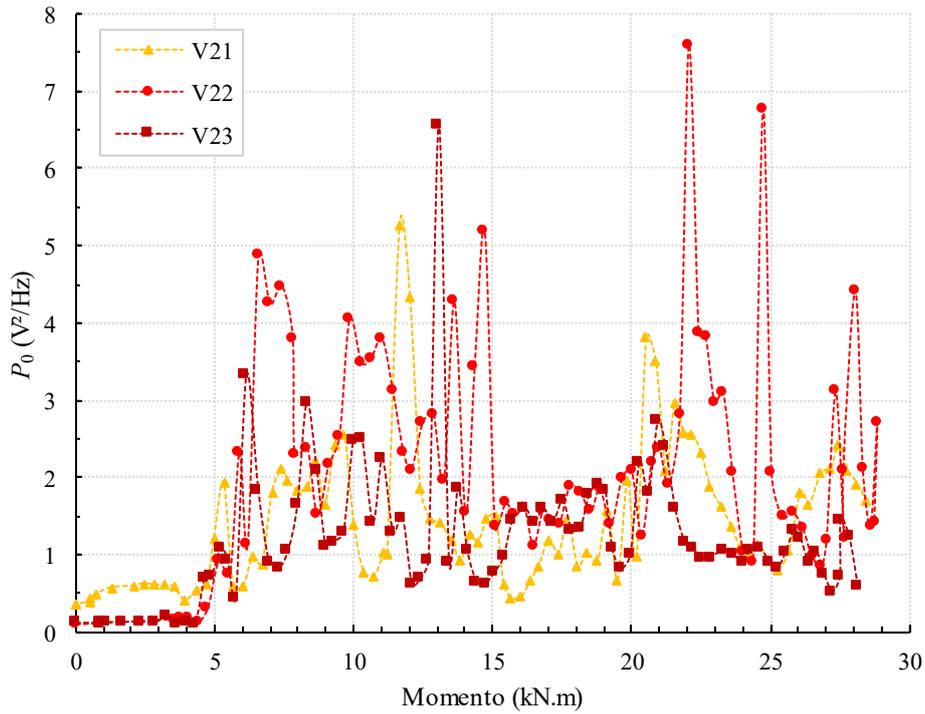
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

As vigas dos lotes L1 e L2 (com exceção da viga V21) apresentaram as menores variações, com valores iniciais de P_0 variando entre 0,079 V²/Hz (viga V12) e 0,146 V²/Hz (viga V11). Já as vigas do lote L3 e a viga V21 tiveram valores iniciais mais elevados e dispersos. A partir do momento de fissuração, o desenvolvimento de P_0 se deu de forma considerada aleatória. O comportamento completo do parâmetro P_0 em função do momento fletor atuante nas vigas dos lotes L1, L2 e L3 está apresentado na Figura 79, na Figura 80 e na Figura 81, respectivamente.



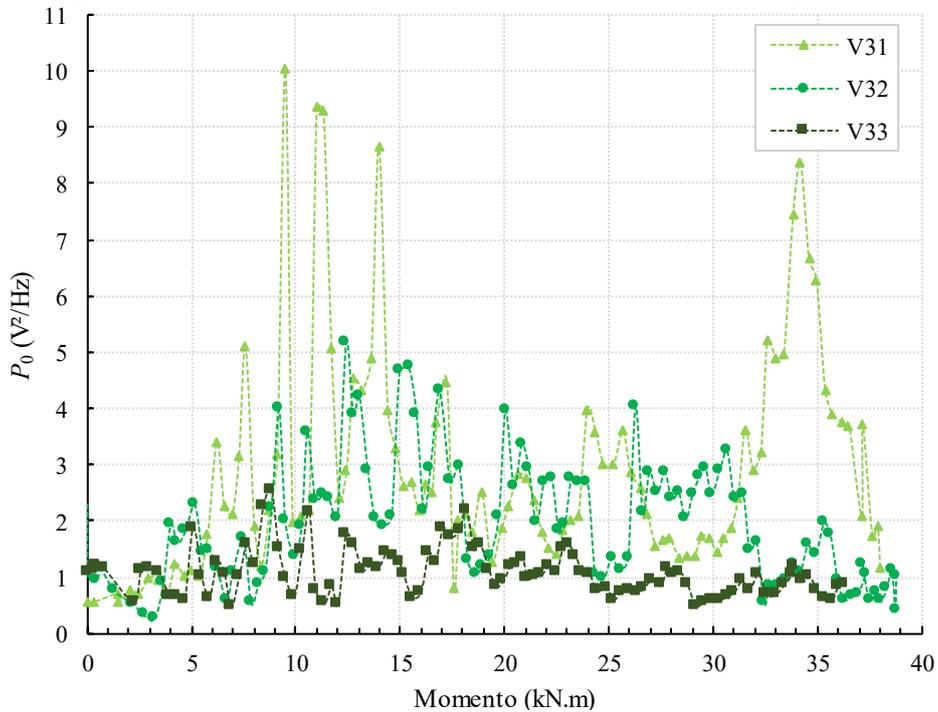
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 80 – Gráfico do P_0 em função do momento fletor das vigas do lote L2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 81 – Gráfico do P_0 em função do momento fletor das vigas do lote L3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Como pode ser visto nas figuras, a partir do momento de fissuração, o parâmetro P_0 apresentou comportamento aparentemente desordenado. Entretanto, mesmo com a presença de picos (que em alguns casos atingiram valores acima de 10 V^2/Hz), nota-se uma

concentração de pontos próxima ao valor de $1 \text{ V}^2/\text{Hz}$, o que seria justificável. Sendo P_0 um fator relacionado à energia inicial depositada pelo transdutor emissor e considerando que no início do processo de análise de sinais foi feita a normalização do formato de onda (ou seja, a amplitude máxima passou a ter valor igual a 1 V), seria aceitável que essa “energia depositada” tivesse valores próximos da unidade.

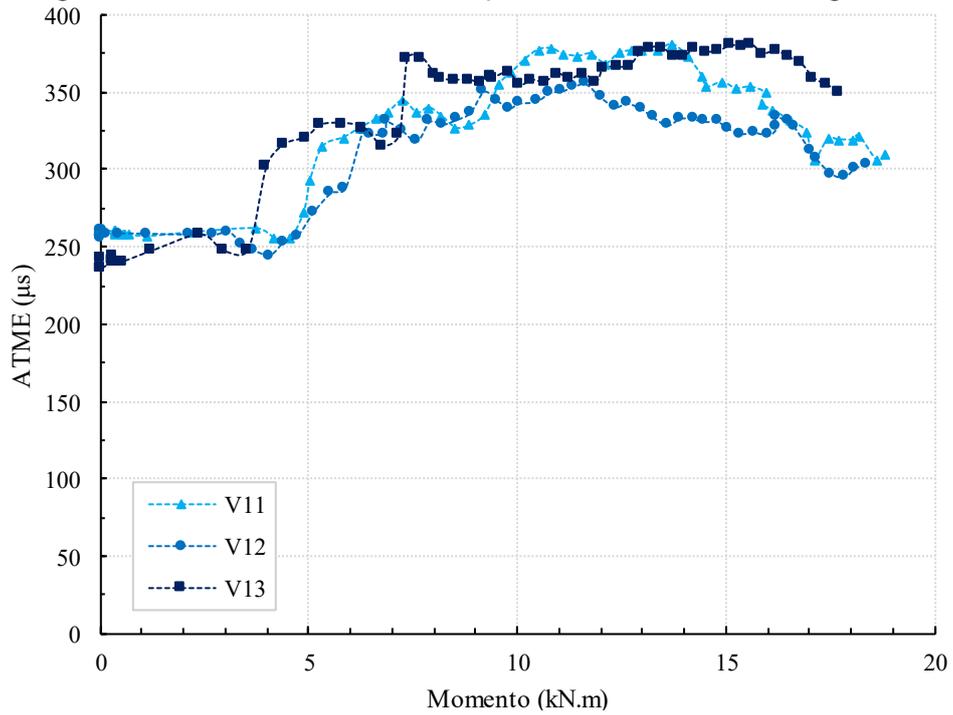
Todavia, como descrito por alguns autores e agora constatado durante a execução dos ensaios e ressaltado nos resultados, esse parâmetro sofre influência de outras variáveis relacionadas ao processo de medição, como o tipo e a quantidade de acoplante utilizado, a pressão aplicada nos transdutores, as condições da superfície de leitura e o uso do receptor pontual, entre outros fatores. Durante a execução dos ensaios, buscou-se manter um padrão no que se refere às variáveis citadas, mas as variações de P_0 se sustentaram. As referências bibliográficas estudadas não apresentaram valores e padrões de comportamento para P_0 , justificando que este não é necessário para a caracterização do material.

Observou-se ainda que as curvas que apresentaram os picos mais elevados correspondem às vigas que também apresentaram maior amplitude de variação dos parâmetros de difusividade, de dissipação e de ATME, que será mostrado a seguir.

6.4.3.4 ATME

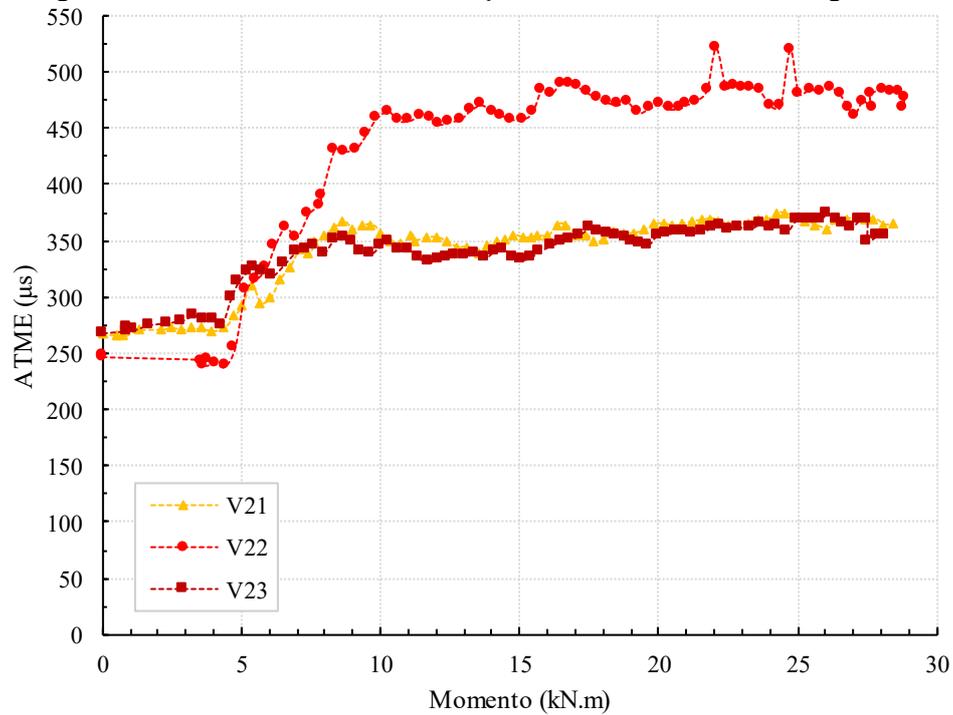
Por último, foi analisado o parâmetro ATME. O comportamento do ATME em função do momento fletor atuante nas vigas dos lotes L1, L2 e L3 está mostrado na Figura 82, na Figura 83 e na Figura 84, respectivamente.

Figura 82 – Gráfico do ATME em função do momento fletor das vigas do lote L1.



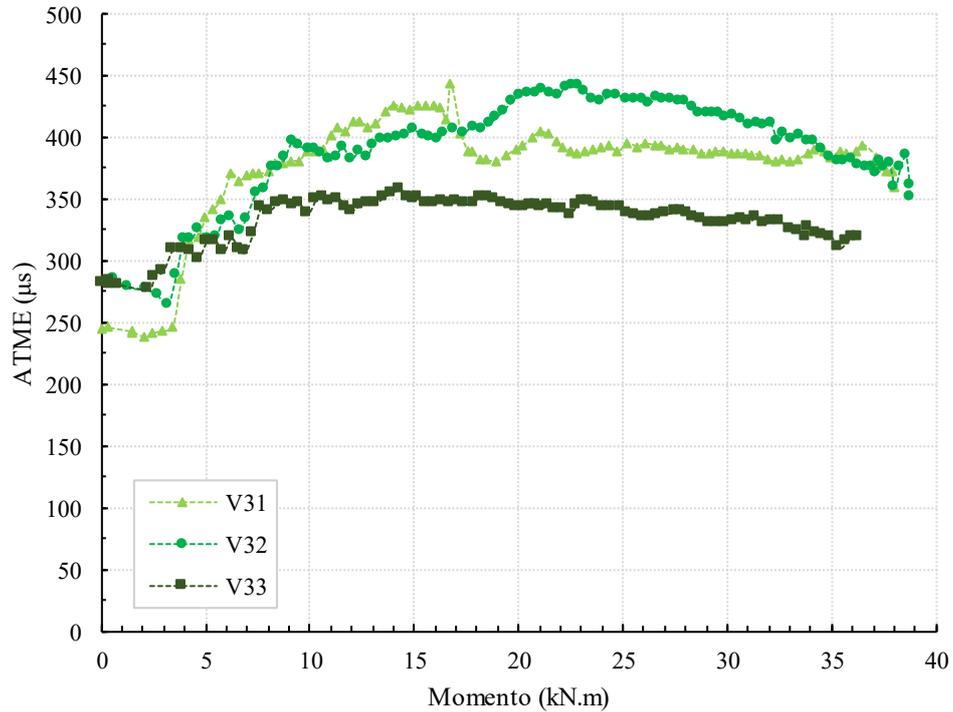
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 83 – Gráfico do ATME em função do momento fletor das vigas do lote L2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

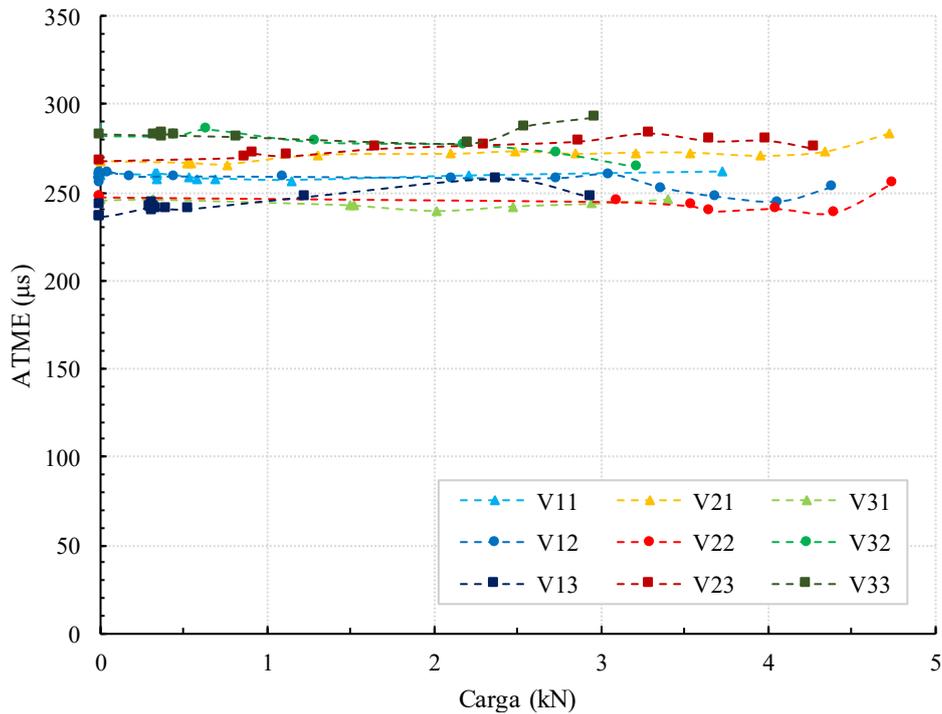
Figura 84 – Gráfico do ATME em função do momento fletor das vigas do lote L3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O desenvolvimento do ATME em função do momento fletor se deu inversamente ao comportamento da difusividade, conforme era previsto. Este foi o parâmetro que apresentou as menores oscilações. Até o momento de fissuração (próximo de 5 kNm), o ATME se manteve praticamente inalterado e próximo dos respectivos valores iniciais, como apresentado na Figura 85. Isso se explica, pois, porquanto o processo de fissuração não havia se iniciado, o tempo de transporte da energia ultrassônica máxima se manteve aproximadamente o mesmo em cada viga.

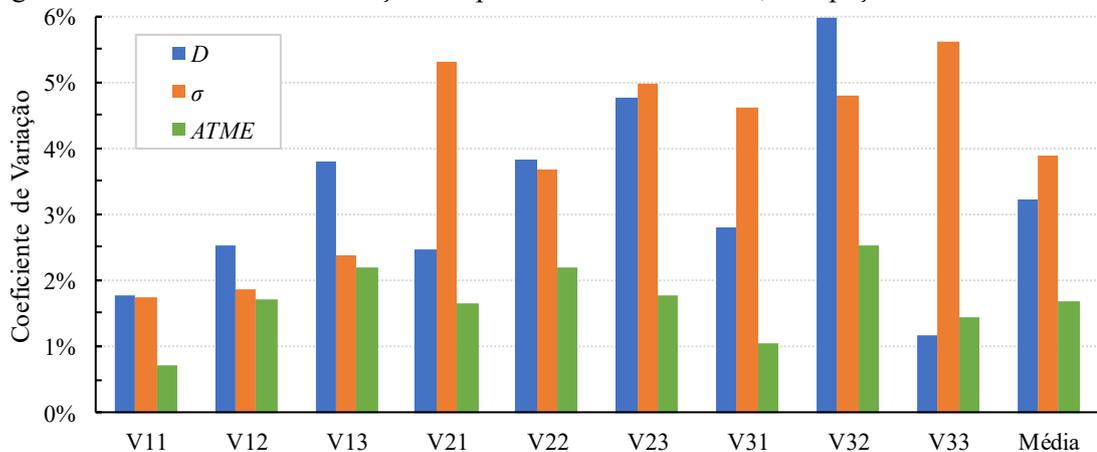
Figura 85 – Variação do ATME antes do momento de fissuração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Entre os valores iniciais, o ATME flutuou entre 239 e 286 μs , com média de 261 μs e coeficiente de variação de 5,9%. No trecho até o momento de fissuração, dentre os quatro parâmetros de difusão analisados, o ATME foi o que apresentou as menores variações. Na Figura 86 está apresentada uma comparação entre os coeficientes de variação dos valores iniciais dos parâmetros de difusividade, dissipação e ATME. O fator P_0 não foi apresentado, pois contém valores de variação muito acima dos demais parâmetros.

Figura 86 – Coeficientes de variação dos parâmetros difusividade, dissipação e ATME iniciais.

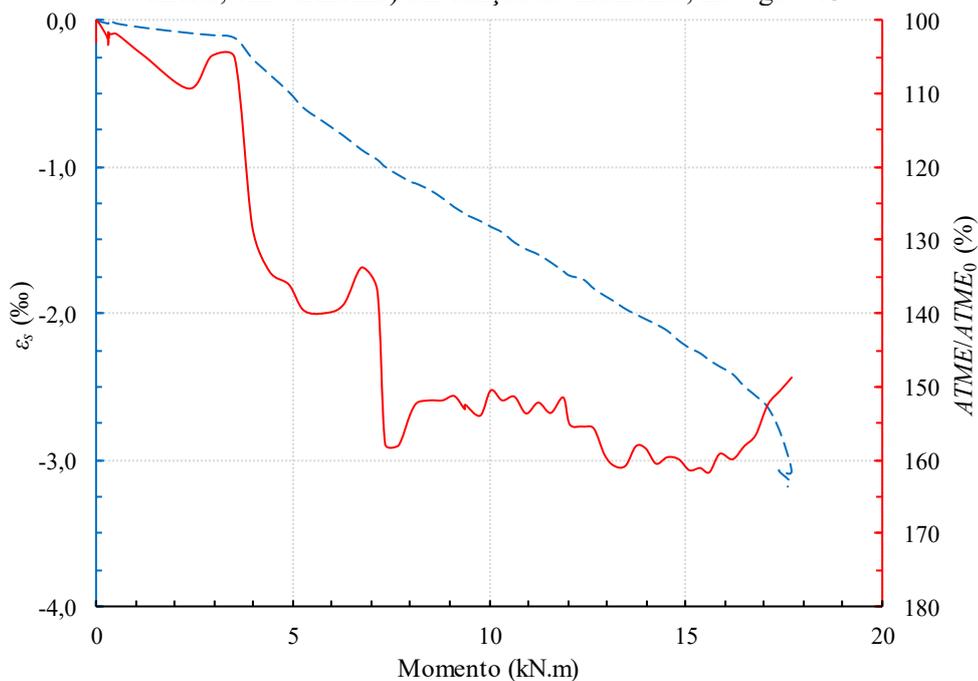


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Como pode ser visto, o ATME foi o parâmetro que apresentou menor variação no estágio I, antes da ocorrência de fissuras. O coeficiente de variação médio do ATME foi de 1,7%, enquanto da difusividade e da dissipação foi de 3,2% e 3,9%, respectivamente. Foi suposto que as flutuações neste intervalo ocorreram devido à acustoelasticidade e ao rearranjo interno dos materiais ocasionado pelo início de aplicação da carga, além da variabilidade já esperada e presente em ensaios experimentais. Nesse sentido, por apresentar os menores coeficientes de variação, pode-se dizer que o ATME foi o parâmetro menos influenciado pelos fenômenos citados, ou seja, o tempo de transporte da energia máxima só foi efetivamente alterado com o início do processo de fissuração.

Em seguida, próximo do momento de fissuração, houve um aumento abrupto dos valores de ATME. Esse padrão mostrou que, assim como foi possível identificar o momento de fissuração utilizando a difusividade, a progressão do ATME também se mostrou capaz de apontar a mudança de comportamento das vigas em decorrência do início da fissuração. Na Figura 87 está apresentado gráfico comparativo entre a curva de deformação do aço e o crescimento do ATME em razão do $ATME_0$, em função do momento fletor, na viga V13. O $ATME_0$ é a média dos valores recuperados das duas primeiras leituras de ultrassom, feitas antes do início de aplicação da carga.

Figura 87 – Comparação entre a deformação do aço (eixo da esquerda, em azul) e o ATME (eixo da direita, em vermelho) em função do momento, na viga V13.

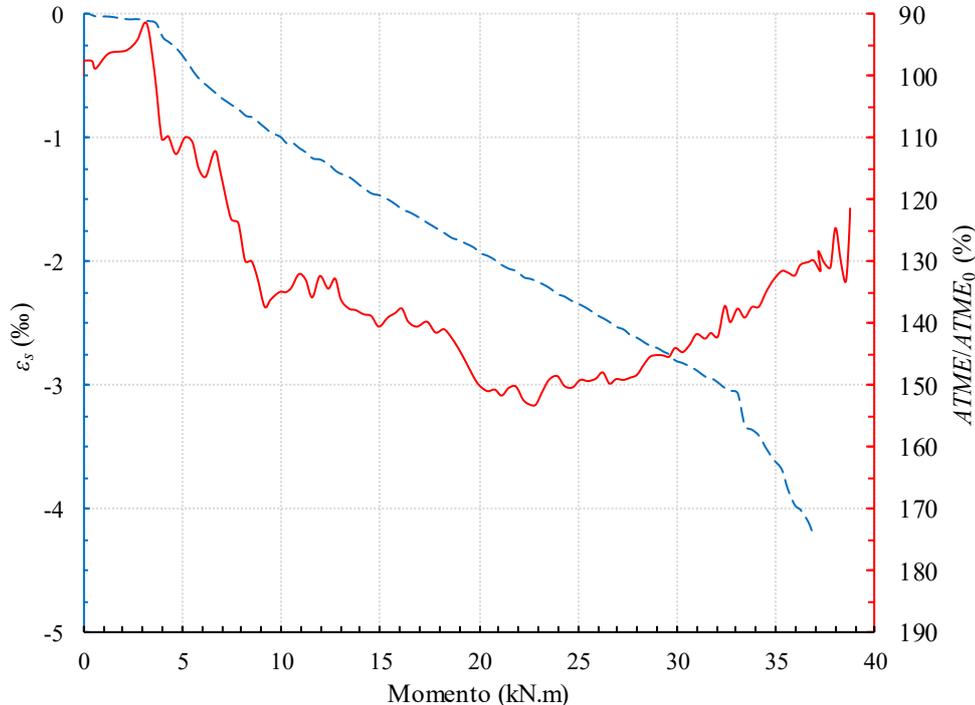


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Percebe-se que o início da fissuração ocorreu entre 3-4 kNm, instante indicado pela mudança de comportamento da curva de deformação da armadura longitudinal de flexão (curva azul). Nesse mesmo momento, é verificado o crescimento rápido do ATME, mostrando que o parâmetro foi alterado pela formação das fissuras e, conseqüentemente, é capaz de identificar esse comportamento.

A partir do início da fissuração, o tempo de transporte da energia ultrassônica máxima foi atrasado, causando um aumento progressivo nos valores de ATME. Ao contrário da difusividade, que apresentou tendências de pouca variação após a fissuração, o ATME se manteve aumentando consideravelmente. Essa evolução se deu até certo ponto, quando houve uma inversão e os valores do parâmetro passaram a decair, isto é, o tempo de transferência da energia máxima começou a ser menor. Essa inversão pode ser vista com mais ênfase na viga V32, como mostrado na Figura 88. Os gráficos comparativos entre a deformação do aço e o ATME das demais vigas estão contidos no Apêndice D.

Figura 88 – Comparação entre a deformação do aço (eixo da esquerda, em azul) e o ATME (eixo da direita, em vermelho) em função do momento, na viga V32.

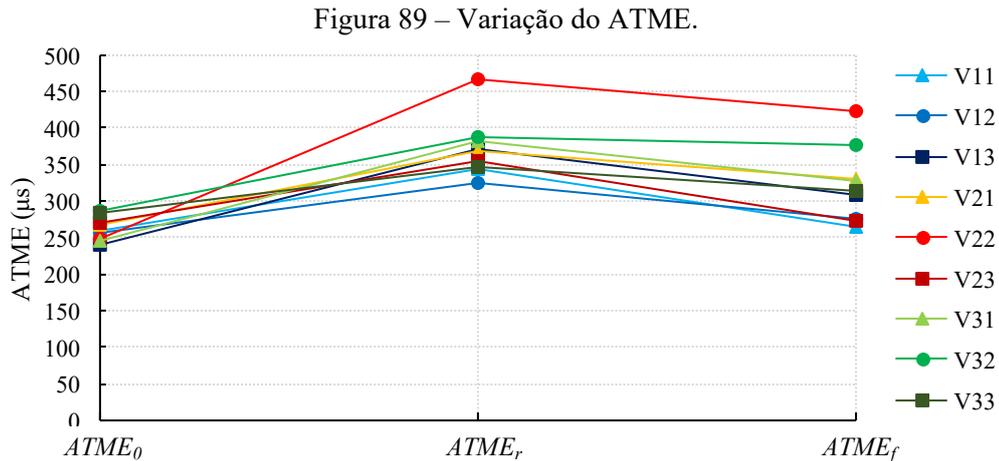


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Assim como no caso difusividade, supõe-se que essa inversão ocorreu, pois progressivamente as ondas teriam deixado de contornar a profundidade das fissuras e passado

a se propagar pelo aço, transportando a energia de forma relativamente mais rápida entre os transdutores.

Uma última consideração foi feita em relação aos valores de ATME recuperados antes do início de aplicação da carga ($ATME_0$), após o momento de fissuração ($ATME_r$) e no final, depois de retirado o carregamento ($ATME_f$), como mostrado na Figura 89.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Devido ao início da fissuração, houve um aumento médio de 42% em relação ao $ATME_0$. Com a retirada completa do carregamento após a ruptura, o tempo de chegada da energia máxima teve uma diminuição de aproximadamente 14% em relação ao $ATME_r$. Contudo, o $ATME_f$ se manteve cerca de 23% maior em comparação com o $ATME_0$, ressaltando que, embora o carregamento tenha sido completamente retirado e a viga voltou para sua posição inicial, ocasionando o fechamento das fissuras, essas continuaram parcialmente abertas e mantiveram o caminho de propagação das ondas alterado, tendo em comparação o caminho de propagação inicial.

Os coeficientes de variação dos valores de $ATME_0$, $ATME_r$ e $ATME_f$ foram de 5,9%, 10,3% e 15,1%, respectivamente. Esse crescimento da dispersão dos valores do tempo de chegada da energia máxima nos três instantes analisados salienta o aumento da aleatoriedade da propagação de ondas causada pela presença das fissuras.

6.5 CORRELAÇÕES

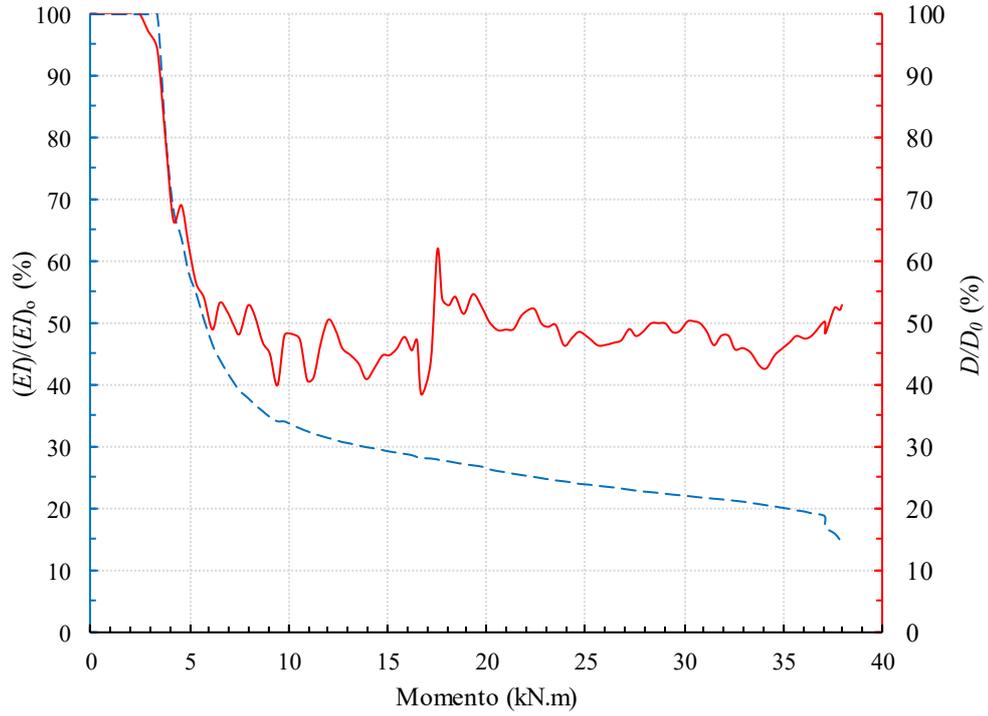
Embora o ensaio de ultrassom tenha sido planejado para avaliar a região central das vigas (região mais solicitada), com os transdutores posicionados simetricamente à seção central, nas correlações com os parâmetros de difusão foram utilizados os valores de rigidez que consideram o comportamento de toda a viga (Figura 59). Por proporcionar uma análise mais global, essa consideração permite extrapolar a avaliação da perda de rigidez ao longo de todo comprimento das vigas a partir do ensaio de ultrassom realizado na região mais crítica.

Sendo assim, com base nos padrões dos parâmetros de difusão apresentados, foram feitas correlações com a perda de rigidez das vigas. Primeiramente, considerando que o fator P_0 apresentou um comportamento tido como aleatório, que não há referências literárias sobre seu comportamento e sua ordem de grandeza e que este não é necessário para a caracterização do material, o P_0 não foi admitido relevante nas correlações.

No tocante à dissipação, foi constatado que este parâmetro não apresentou um comportamento previsível, uma vez que descreve um processo aleatório – perda de energia interna associada a propriedades viscoelásticas do material – e se mostrou influenciado pelo desenvolvimento, também aleatório, de fissuras. À vista disso, as correlações entre a dissipação e a perda de rigidez das vigas não se mostraram pertinente.

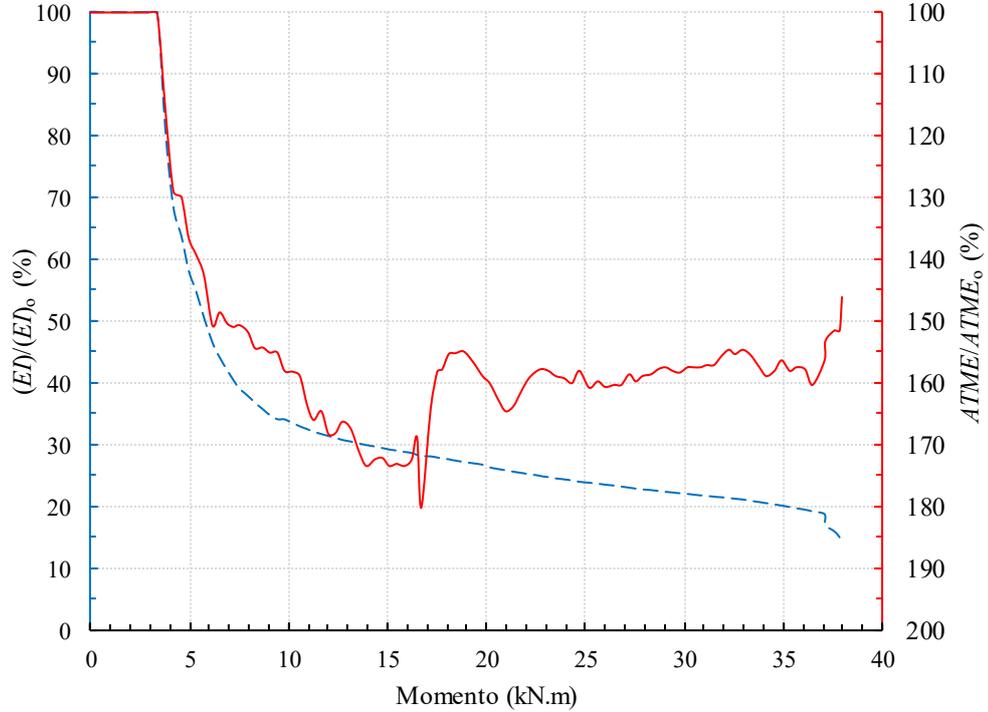
No que concerne aos parâmetros de difusividade e de ATME, verificou-se uma boa correlação com a perda de rigidez. Na Figura 90 está apresentada a comparação entre a perda de rigidez e a diminuição relativa da difusividade (D/D_0), enquanto na Figura 91 está mostrada a perda de rigidez em função do aumento relativo do ATME em relação ao seu valor inicial ($ATME/ATME_0$), ambos relacionados à viga V31. Os gráficos comparativos entre a perda de rigidez e os parâmetros de difusão das demais vigas estão contidos no Apêndice E.

Figura 90 – Comparação entre os comportamentos da perda de rigidez e da difusividade, da viga V31.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

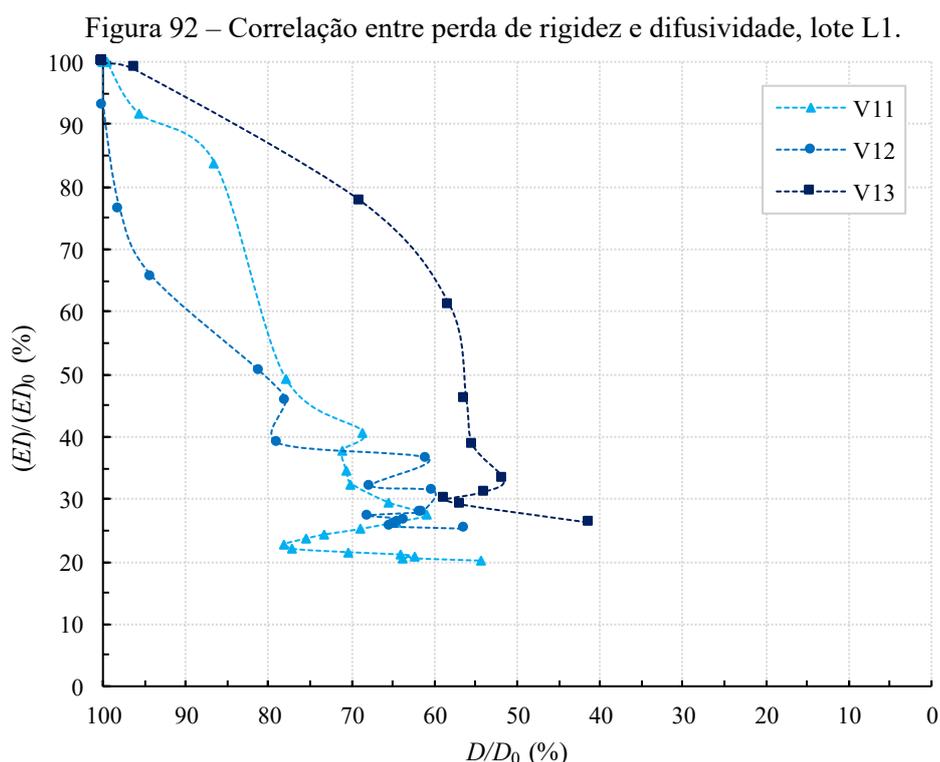
Figura 91 – Comparação entre os comportamentos da perda de rigidez e do ATME, da viga V31.



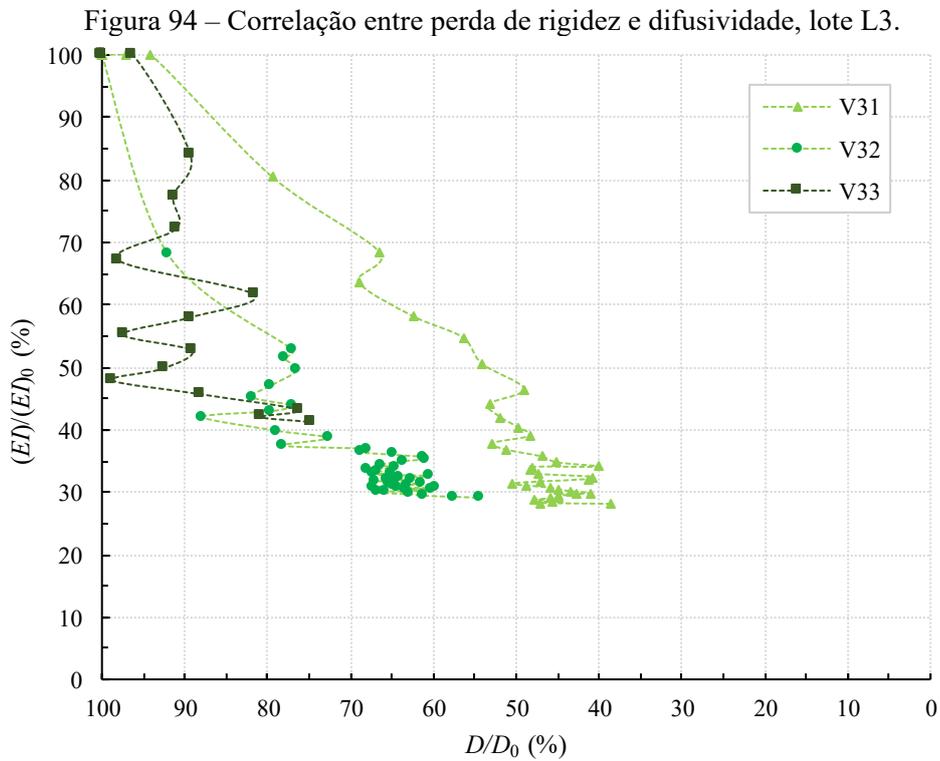
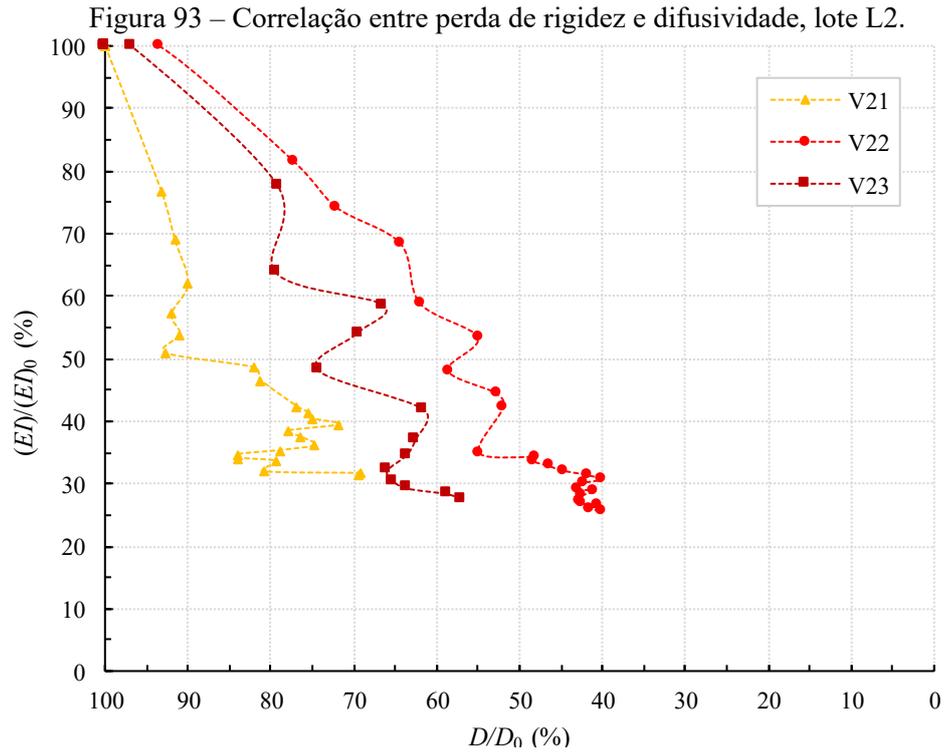
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

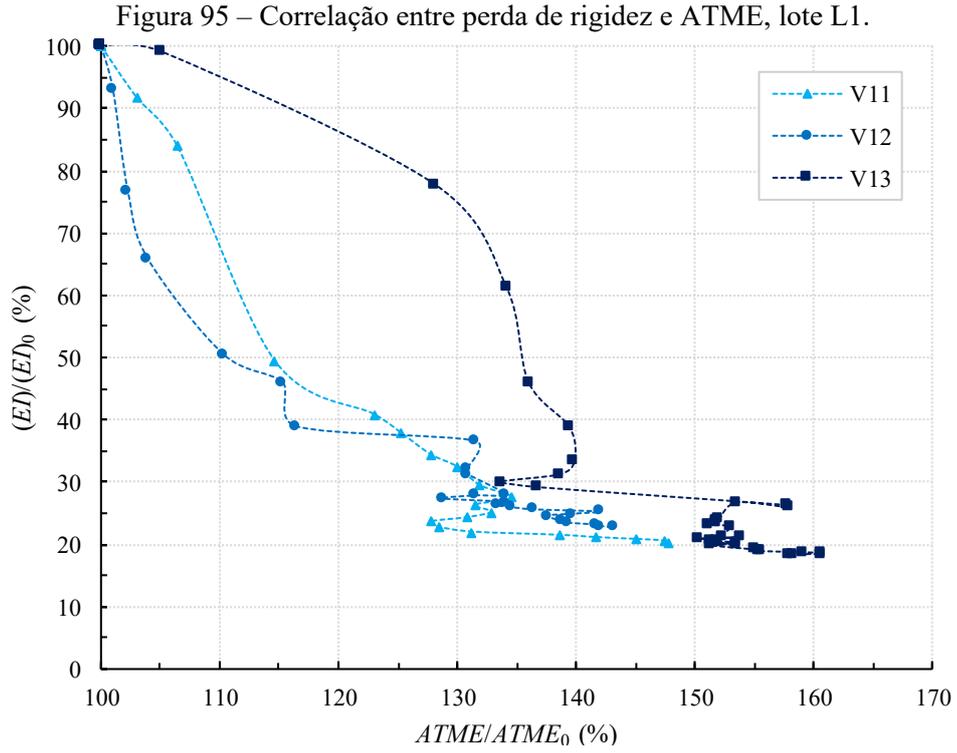
Observa-se que os parâmetros de difusão tendem a se comportar de maneira associada à variação das rigidezes das vigas: com a progressão da perda de rigidez, ocorre a diminuição da razão D/D_0 e o aumento da razão $ATME/ATME_0$. Graficamente, as comparações com o ATME se mostraram mais sensíveis à diminuição da rigidez, pois além de apresentar menos oscilações, a progressão do ATME se deu de forma mais acentuada, acompanhando a perda de rigidez.

Com base nas observações e nas análises até aqui apresentadas, foram feitas as correlações entre a perda de rigidez e os parâmetros de difusividade e de ATME. Na Figura 92, na Figura 93 e na Figura 94 estão apresentadas as perdas de rigidezes em relação à diminuição da difusividade (D/D_0) das vigas dos lotes L1, L2 e L3, respectivamente. Em seguida, na Figura 95, na Figura 96 e na Figura 97 estão mostradas as perdas de rigidezes em função do aumento do ATME (indicado pela razão $ATME/ATME_0$) das vigas dos lotes L1, L2 e L3, respectivamente.

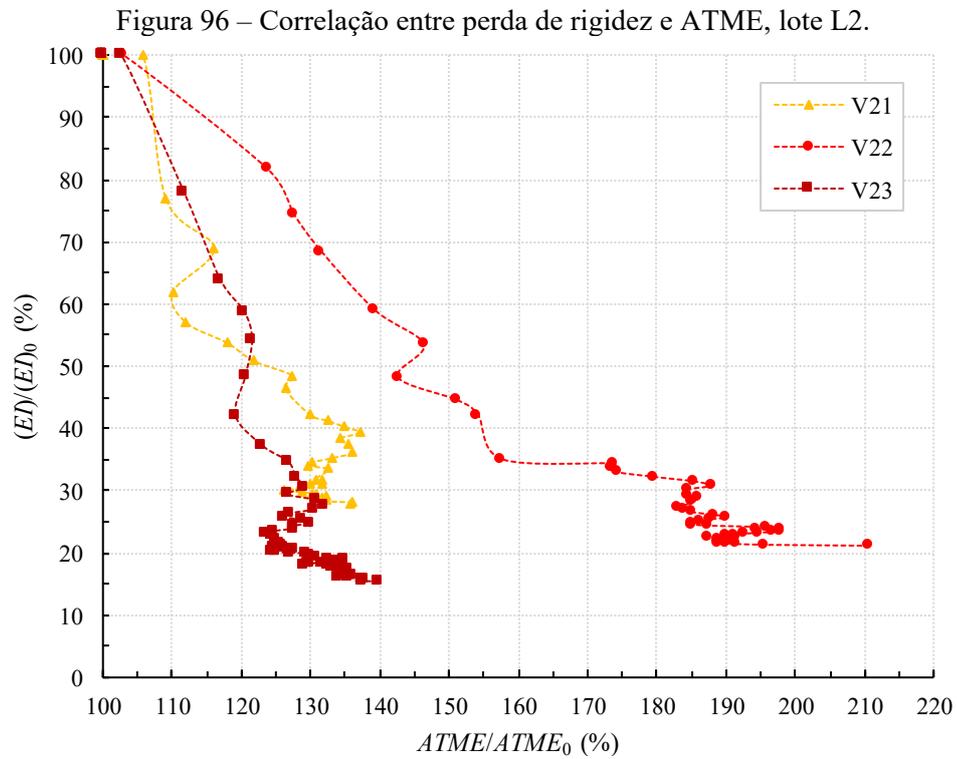


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

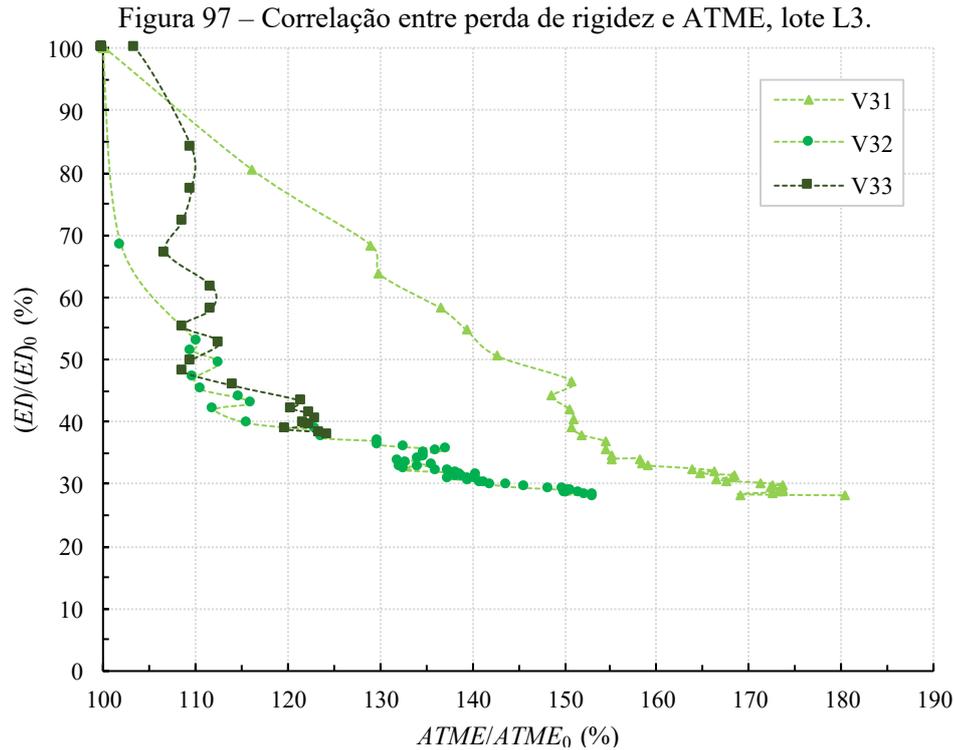




Fonte: Elaborado pelo autor (2019).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A partir das correlações apresentadas, foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson entre os dados de perda de rigidez e os parâmetros de difusão em análise. O coeficiente de correlação de Pearson, ou simplesmente coeficiente de correlação, é uma medida da correlação entre duas variáveis quantitativas utilizada para determinar se essas variáveis tendem a se mover juntas, isto é, se grandes valores de uma variável tendem a estar associados a grandes valores da outra (correlação positiva), se valores pequenos de uma variável tendem a estar associados a valores maiores da outra (correlação negativa) ou se os valores de ambas as variáveis tendem a não estar relacionados (correlação com valores próximos de zero). Esse coeficiente é dimensionado de modo que seu valor esteja entre -1 e +1 (inclusive) e seja independente das unidades nas quais as duas variáveis de medição são expressas.

O cálculo dos coeficientes de correlação foi feito por meio da ferramenta *Data Analysis* do Excel, no qual foi considerado o intervalo entre o início do carregamento e o instante em que ocorre a inversão de comportamento dos parâmetros (intervalo dos dados apresentados nas figuras acima). Por exemplo, em relação à viga V31, cujo comportamento está mostrado na Figura 90 e na Figura 91, o intervalo considerado foi do momento fletor igual a zero até 16,7 kNm, instante a partir do qual os gráficos de difusividade e de ATME

passam a ter uma tendência invertida. Além disso, nesse instante, já ocorreu mais de 70% de perda da rigidez inicial. Como o objetivo é quantificar a perda de rigidez por meio dos parâmetros, o intervalo de interesse passa a ser especificamente aquele em que ocorre sua diminuição mais acentuada. Os coeficientes obtidos estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Coeficiente de correlação entre a perda de rigidez e os parâmetros de difusão das vigas.

| Viga | Difusividade | ATME |
|-------------|---------------------|-------------|
| V11 | 0,91 | -0,91 |
| V12 | 0,94 | -0,93 |
| V13 | 0,93 | -0,93 |
| V21 | 0,82 | -0,87 |
| V22 | 0,98 | -0,96 |
| V23 | 0,84 | -0,85 |
| V31 | 0,97 | -0,97 |
| V32 | 0,85 | -0,91 |
| V33 | 0,66 | -0,82 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Em geral, as correlações da perda de rigidez com o ATME apresentaram coeficientes de correlação maiores ou iguais à difusividade. Para o ATME, o coeficiente médio foi de -0,91, enquanto para a difusividade foi de 0,88 (valores negativos indicam proporcionalidade inversa entre as variáveis). Exceto na correlação com a difusividade da viga V33, as correlações apresentaram coeficientes acima de 0,80 (em módulo), ou seja, as variáveis possuem forte associação entre si. Dessa forma, conclui-se ser possível estimar a perda de rigidez por meio dos parâmetros de difusão, ainda que qualitativamente.

7 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado buscou avaliar o comportamento de vigas de concreto armado submetidas ao ensaio de flexão, no que diz respeito à perda de rigidez causada pelo processo de formação de fissuras de flexão, por meio do ensaio de ultrassom e da aplicação do método da difusão ultrassônica.

No tocante ao posicionamento dos transdutores no ensaio de ultrassom, notou-se um aumento da difusividade com o aumento da distância entre transdutores, causada pelo maior índice de dispersão das ondas ao se propagarem em um caminho maior. A dissipação não demonstrou uma tendência clara de comportamento, mas os valores médios e as variações foram compatíveis com resultados encontrados por outros autores. O ATME apresentou as menores variações e um comportamento linear em função da distância entre transdutores. Já o P_0 cresceu de forma aproximadamente exponencial com o aumento da distância entre transdutores e foi o parâmetro que resultou nos maiores coeficientes de variação entre as 10 leituras em cada posição.

A escolha da distância utilizada nos ensaios de ultrassom baseou-se nos ganhos utilizados nos ensaios preliminares. A distância adotada de 30 cm permitiu caracterizar um volume significativo da região mais solicitada das vigas, sem a necessidade de aplicar um ganho elevado logo no início. Ainda nos ensaios preliminares, verificou-se que a utilização do receptor pontual proporcionou valores de parâmetros de difusão com menores variações. Por essa razão, decidiu-se por utilizar o cone de aço acoplado ao transdutor receptor, caracterizando uma recepção pontual do sinal ultrassônico.

A influência do parâmetro Δt na análise tempo-frequência foi avaliada com base na resolução do sinal nos domínios do tempo e da frequência e no efeito de *spectral leakage* no janelamento do sinal, sendo adotado $\Delta t = 32 \mu\text{s}$. Quanto ao parâmetro Δf , sua influência está associada ao intervalo do espectro de potência considerado na determinação da densidade espectral de energia. Foi assumido $\Delta f = 400 \text{ kHz}$, de forma que todo o espectrograma de potência fosse levado em conta na análise.

A partir de correlações com o comportamento das estruturas (deformações, curvaturas etc.), foi avaliada a influência do processo de formação e de propagação de fissuras nos parâmetros de difusão recuperados dos sinais ultrassônicos medidos durante os ensaios de flexão. Antes de atingir o momento fletor de fissuração, os parâmetros de difusão

apresentaram pouca variação. Nesse intervalo, as variações ocorridas foram atribuídas ao fenômeno de acustoelasticidade e à reestruturação da microestrutura interna causada pela introdução do carregamento, além da variação esperada inerente a ensaios experimentais.

Os parâmetros difusividade e ATME foram sensíveis ao início da fissuração das vigas, mostrando sua aplicabilidade na identificação do momento de fissuração. Embora a dissipação e o P_0 também tenham sofrido alterações de comportamento devido ao início da fissuração, estes parâmetros não apresentaram uma tendência subsequente bem definida, o que impossibilitou a indicação do momento de fissuração de forma precisa.

Com a progressão das fissuras, os valores de difusividade tiveram uma tendência descendente, enquanto o tempo de chegada da máxima energia (ATME) aumentou. Próximo da carga de ruptura, houve uma inversão no comportamento desses parâmetros, supostamente devido a mudanças no caminho de propagação das ondas. Não foi possível estabelecer um padrão no comportamento da dissipação e do P_0 , embora este último tenha apresentado uma maior concentração de valores próximo da unidade.

Em relação à influência das armaduras, levantou-se a hipótese de que, em altos níveis de fissuração, as ondas teriam caminhado pela armadura e, dessa maneira, modificado o comportamento dos parâmetros de difusão. Referente às diferentes taxas de armaduras utilizadas, não foi identificada uma influência direta dessa variável nos valores dos parâmetros. Indiretamente, as diferentes taxas de armaduras resultaram em diferentes padrões de perda de rigidez, que, por sua vez, se mostraram passíveis de serem avaliados pelo desenvolvimento dos parâmetros de difusão.

Após serem correlacionados com a rigidez efetiva das estruturas, observou-se que dois parâmetros de difusão apresentaram uma tendência em se comportar de maneira associada à variação das rigidezes das vigas, demonstrando potencial na avaliação da perda de rigidez: a difusividade e o ATME. Os parâmetros foram considerados por meio da variação relativa em comparação com seus valores iniciais – D/D_0 e $ATME/ATME_0$. As comparações da perda de rigidez com o ATME e com a difusividade resultaram em coeficientes de correlação médios de -0,91 e 0,88, respectivamente. Os coeficientes de correlação obtidos indicam uma forte associação entre as variáveis relacionadas, mostrando ser possível avaliar qualitativamente a perda de rigidez das vigas a partir dos parâmetros de difusão.

Em conclusão, a metodologia proposta foi possível de ser implementada e apresentou resultados satisfatórios, que permitiram relacionar variações de comportamento dos parâmetros ultrassônicos a etapas do processo de fissuração de vigas submetidas à flexão e, posteriormente, estabelecer correlações qualitativas com a perda de rigidez.

7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no trabalho apresentado e nos resultados obtidos, entende-se ser necessário a elaboração de estudos complementares que possibilitem um melhor entendimento do comportamento de ondas ultrassônicas em função do processo de fissuração e da funcionalidade matemática do método da difusão ultrassônica. Dessa forma, são sugeridos os seguintes aspectos para serem avaliados em trabalhos futuros:

- Avaliar a variabilidade dos parâmetros de difusão a partir de um número maior de amostras;
- Avaliar o comportamento dos parâmetros de difusão antes do início da fissuração e identificar causas para as variações nesse intervalo;
- Avaliar a influência da armadura nos parâmetros de difusão, comparando dados de ensaios de ultrassom obtidos a partir de corpos de prova com e sem armadura;
- Avaliar, por meio de modelagens numéricas, o comportamento interno das ondas ultrassônicas em contato com fissuras, identificando os possíveis caminhos de propagação das ondas nessa situação;
- Avaliar e quantificar os fatores intervenientes no P_0 .

REFERÊNCIAS

AGGELIS, Dimitrios G.; SHIOTANI, Tomoki. Experimental study of surface wave propagation in strongly heterogeneous media. **The Journal Of The Acoustical Society Of America**, [s.l.], v. 122, n. 5, p.151-157, 2007. Acoustical Society of America (ASA). <http://dx.doi.org/10.1121/1.2784151>.

AHN, Eunjong et al. Effectiveness of diffuse ultrasound for evaluation of micro-cracking damage in concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 124, p.105862-105870, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105862>.

ALMEIDA, Sandra Freire de. **Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura**. 2005. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ANUGONDA, Phanidhar; WIEHN, Joshua S.; TURNER, Joseph A. Diffusion of ultrasound in concrete. **Ultrasonics**, [s.l.], v. 39, n. 6, p.429-435, out. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0041-624x\(01\)00077-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0041-624x(01)00077-4).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228**: Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. Farmington Hills, 2013.

ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por ultrassom**: aplicação industrial. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos, 2018. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/apostila_us_2018.pdf>. Acesso em: 14 de ago. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

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

_____. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

BECKER, Jens; JACOBS, Laurence J.; QU, Jianmin. Characterization of Cement-Based Materials Using Diffuse Ultrasound. **Journal Of Engineering Mechanics**, [s.l.], v. 129, n. 12, p.1478-1484, dez. 2003. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2003\)129:12\(1478\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2003)129:12(1478)).

BUNGEY, John H.; MILLARD, Stephen G.; GRANTHAM, Michael G. **Testing of Concrete in Structures**. 4. ed. New York: Taylor & Francis, 2006.

CARELLI, Jhulis Marina. **Análise do comportamento de ondas ultrassônicas em elementos fissurados de concreto e argamassa**. 2014. 205 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

CARMO, Daniel Chauviere do et al. Identificação por ultra-som das regiões de tensões trativas e compressivas numa barra fletida. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.13-17, 2007. Editora Cubo Multimidia. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00401003>.

CARVALHO, Roberto C.; FILHO, Jasson. R. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de Concreto Armado: Segundo a NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2015.

CHEEKE, J. David N. **Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves**. 2. ed. New York: Taylor & Francis Group, 2012.

CLÍMACO, João Carlos T. S. **Estruturas de concreto armado: Fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 2. ed. Brasília: Editora UnB, Finatec, 2008.

COX, Trevor J.; D'ANTONIO, Peter. **Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application**. 1. ed. London/New York: Spon Press, 2004.

DEROO, Frederik. **Damage detection in concrete using diffuse ultrasound measurements and an effective medium theory for wave propagation in multi-phase materials**. 2009. 106 f. Thesis (Master's Degree) - School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute Of Technology, Atlanta, 2009.

DEROO, Frederik et al. Detection of damage in concrete using diffuse ultrasound. **The Journal Of The Acoustical Society Of America**, [s.l.], v. 127, n. 6, p.3315-3318, jun. 2010. Acoustical Society of America (ASA). <http://dx.doi.org/10.1121/1.3409480>.

FRÖJD, Patrik; ULRIKSEN, Peter. Frequency selection for coda wave interferometry in concrete structures. **Ultrasonics**, [s.l.], v. 80, p.1-8, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2017.04.012>.

GERE, James M.; TIMOSHENKO, Stephen P. **Mechanics of Materials**. 3e. Springer-Science+Business Media, 1991.

GRÊT, Alexandre; SNIEDER, Roel; SCALES, John. Time-lapse monitoring of rock properties with coda wave interferometry. **Journal Of Geophysical Research: Solid Earth**, [s.l.], v. 111, n. 3, p.1-11, mar. 2006. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2004jb003354>.

GUARDA, Mônica Cristina Cardoso da. **Cálculo de deslocamento em pavimentos de edifícios de concreto armado**. 2005. 266 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

HELLIER, Charles. **Handbook of nondestructive evaluation**. 1. ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2001.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HOFMANN, Mateus de Assunção. **Atenuação da energia do sinal ultrassônico na detecção de danos por fissuração no concreto**. 2015. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

IN, Chi-won. **Defect Characterization in Heterogeneous Civil Materials Using Ultrasound**. 2013. 169 f. Dissertation (Doctor of Philosophy's Degree) - School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute Of Technology, Atlanta, 2013.

IN, Chi-won et al. Monitoring and evaluation of self-healing in concrete using diffuse ultrasound. **Ndt & e International**, [s.l.], v. 57, p.36-44, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.03.005>.

IN, Chi-won et al. Estimation of Crack Depth in Concrete Using Diffuse Ultrasound: Validation in Cracked Concrete Beams. **Journal Of Nondestructive Evaluation**, [s.l.], v. 36, n. 1, p.1-9, 29 nov. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10921-016-0382-4>.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IEAE). **Guidebook on non-destructive testing of concrete structures**. Training Course Series No. 17. Vienna: IEAE, 2002.

JIANG, Hanwan et al. Diffusion Coefficient Estimation and Its Application in Interior Change Evaluation of Full-Size Reinforced Concrete Structures. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 31, n. 3, p.1-10, mar. 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002609](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002609).

KRAUTKRÄMER, Josef; KRAUTKRÄMER, Herbert. **Ultrasonic testing of materials**. 4. ed. Berlim: Springer-Verlag, 1990.

KUTNER, Michael H. et al. **Applied linear statistical models**. 5.ed. Boston: McGraw-Hill Irwin, 2005.

LAROSE, Eric et al. Diffuse ultrasound monitoring of stress and damage development on large scale concrete structures. **The Journal Of The Acoustical Society Of America**, [s.l.], v. 141, n. 5, p.3831-3831, maio 2017. Acoustical Society of America (ASA). <http://dx.doi.org/10.1121/1.4988505>.

LILLAMAND, Ivan et al. Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading. **Ndt & e International**, [s.l.], v. 43, n. 8, p.655-660, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.07.001>.

MARTINS, Pedro Paulo Mingote. **Avaliação do preenchimento com sistema epóxi de fendas induzidas em estruturas de concreto utilizando o método de difusão da energia de ondas ultrassônicas**. 2018. 73 f. Qualificação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

MEDEIROS, Arthur. **Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado**. 2007. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

MOUMOUNI, Zoukanéri Ibrahim. **Análise Tempo-Frequência do Sinal Sísmico Utilizando a Distribuição Wigner-Ville e o Método de Máxima Entropia: Aplicações para Estimativa do Fator Q e de Atributos**. 2014. 202 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. In: MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**. 2. ed. West Conshohocken: CRC Press LLC, 2004.

OLYMPUS. **Compreendendo os transdutores ultrassônicos**. Estados Unidos: Olympus, 2017. Disponível em: < https://www.olympus-ims.com.cn/zh/.downloads/download/?file=285217313&fl=pt_PT >. Acesso em: 31 de ago. 2018.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W.; BUCK, John R. **Discrete-time signal processing**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998.

PAES, José Luiz Rangel. **Contribuição ao projeto de elementos pré-fabricados de argamassa armada com ênfase na durabilidade**. 1994. 275 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1994.

PAGE, J. H. et al. Experimental test of the diffusion approximation for multiply scattered sound. **Physical Review e**, [s.l.], v. 52, n. 3, p.3106-3114, 1 set. 1995. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physreve.52.3106>.

PAYAN, Cédric; ABRAHAM, Odile; GARNIER, Vincent. Ultrasonic Methods. In: BALAYSSAC, Jean-Paul; GARNIER, Vincent. **Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures**. Great Britain and United States: ISTE Press and Elsevier, 2018, p. 21-86.

PHILIPPIDIS, T.p.; AGGELIS, D.g. Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. **Ultrasonics**, [s.l.], v. 43, n. 7, p.584-595, jun. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2004.12.001>.

PINHEIRO, Libânio M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 2007.

PLANÈS, T.; LAROSE, E.. A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 53, p.248-255, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.07.009>.

PUNURAI, W. et al. Characterization of dissipation losses in cement paste with diffuse ultrasound. **Mechanics Research Communications**, [s.l.], v. 34, n. 3, p.289-294, abr. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechrescom.2006.10.003>.

QUIVIGER, Audrey. **Ultrasons diffus pour la caractérisation d'une fissure dans le béton: Approche linéaire et non linéaire**. 2012. 209 f. Thèse (Doctorat) - École Doctorale: Sciences Pour L'ingénieur: Mécanique, Physique, Micro Et Nanoélectronique, Université Aix-marseille, Marseille, 2012.

QUIVIGER, A. et al. Effect of the presence and size of a real macro-crack on diffuse ultrasound in concrete. **Ndt & e International**, [s.l.], v. 45, n. 1, p.128-132, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.09.010>.

RAMAMOORTHY, S. K.; KANE, Y.; TURNER, J. A. Ultrasound diffusion for crack depth determination in concrete. **The Journal Of The Acoustical Society Of America**, [s.l.], v. 115, n. 2, p.523-529, fev. 2004. Acoustical Society of America (ASA).
<http://dx.doi.org/10.1121/1.1642625>.

ROCHA, A. C. *et al.* Ensaio de Stuttgart - Reprodução em Laboratório. In: 46º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais ...** Florianópolis: IBRACON, 2004.

SAVARIS, Gustavo. **Resistência ao cisalhamento do concreto autoadensável**. 2016. 248 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SCHICKERT, M.; KRAUSE, M. Ultrasonic techniques for evaluation of reinforced concrete structures. In: MAIERHOFER, C; REINHARDT, H.-W.; DOBMANN, G. **Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures**. Volume 2: Non-destructive testing methods. Boca Raton: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2010, p. 490-530.

SCHURR, Dennis P. *et al.* Damage detection in concrete using coda wave interferometry. **Ndt & e International**, [s.l.], v. 44, n. 8, p.728-735, dez. 2011. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.07.009>.

SEHER, Matthias *et al.* Numerical and Experimental Study of Crack Depth Measurement in Concrete Using Diffuse Ultrasound. **Journal Of Nondestructive Evaluation**, [s.l.], v. 32, n. 1, p.81-92, 18 nov. 2012. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10921-012-0161-9>.

SHIOTANI, T.; AGGELIS, D. G.. Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage. **Materials And Structures**, [s.l.], v. 42, n. 3, p.377-384, 13 maio 2008. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-008-9388-4>.

SILVA, Priscila Moreira da. **Análise da perda de rigidez em vigas de concreto armado devido à fissuração por esforços de flexão utilizando ensaio de ultrassom**. 2017. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SOUZA, Fabio Caon de. **Avaliação do preenchimento com sistema epóxi de fendas induzidas em estruturas de concreto pela análise do sinal ultrassônico**. 2017. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

- SOUZA, Vicente C. M.; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.
- STOICA, Petre; MOSES, Randolph. **Spectral analysis of signals**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005.
- WEAVER, Richard. Ultrasonics in an aluminum foam. **Ultrasonics**, [s.l.], v. 36, n. 1-5, p.435-442, fev. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0041-624x\(97\)00064-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0041-624x(97)00064-4).
- WEAVER, Richard L.; SACHSE, Wolfgang. Diffusion of ultrasound in a glass bead slurry. **The Journal Of The Acoustical Society Of America**, [s.l.], v. 97, n. 4, p.2094-2102, abr. 1995. Acoustical Society of America (ASA). <http://dx.doi.org/10.1121/1.412002>.
- YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física II: termodinâmica e ondas**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008.
- ZHAN, Hanyu; JIANG, Hanwan; JIANG, Ruinian. Three-dimensional images generated from diffuse ultrasound wave: detections of multiple cracks in concrete structures. **Structural Health Monitoring**, [s.l.], p.1-14, 13 mar. 2019. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1475921719834045>.
- ZHANG, Yuxiang et al. Diffuse ultrasound monitoring of stress and damage development on a 15-ton concrete beam. **The Journal Of The Acoustical Society Of America**, [s.l.], v. 139, n. 4, p.1691-1701, abr. 2016. Acoustical Society of America (ASA). <http://dx.doi.org/10.1121/1.4945097>.

APÊNDICE A – Composição granulométrica dos agregados

Caracterização do agregado graúdo – Brita 1:

| Peneiras # (mm) | Amostra 1 | | | Amostra 2 | | | Média |
|--------------------|---------------------|-------------|----------------|---------------------|-------------|----------------|----------------|
| | Massa Retida (g) | % Retida | % Acumulada | Massa Retida (g) | % Retida | % Acumulada | % Acumulada |
| 19,0 | 19,6 | 0% | 0% | 36,7 | 1% | 1% | 1% |
| 12,5 | 3110,0 | 58% | 58% | 3260,0 | 59% | 59% | 59% |
| 9,5 | 1760,0 | 33% | 91% | 1760,0 | 32% | 91% | 91% |
| 6,3 | 339,5 | 6% | 97% | 358,3 | 6% | 97% | 97% |
| 4,75 | 71,6 | 1% | 99% | 91,8 | 2% | 99% | 99% |
| 2,36 | - | 0% | 99% | - | 0% | 99% | 99% |
| 1,18 | - | 0% | 99% | - | 0% | 99% | 99% |
| 0,6 | - | 0% | 99% | - | 0% | 99% | 99% |
| 0,3 | - | 0% | 99% | - | 0% | 99% | 99% |
| 0,15 | - | 0% | 99% | - | 0% | 99% | 99% |
| 0,075 | - | 0% | 99% | - | 0% | 99% | 99% |
| Fundo | 64,4 | 1% | 100% | 51,4 | 1% | 100% | 100% |
| Soma | 5365,1 | 100% | | 5558,2 | 100% | | |

Diâmetro máximo 19,0 mm

Módulo de finura 6,85

Massa específica (g/cm³) 2,65 g/cm³

Caracterização do agregado miúdo – Areia natural:

| Peneiras # (mm) | Amostra 1 | | | Amostra 2 | | | Média |
|--------------------|---------------------|-------------|----------------|---------------------|-------------|----------------|----------------|
| | Massa Retida (g) | % Retida | % Acumulada | Massa Retida (g) | % Retida | % Acumulada | % Acumulada |
| 1,18 | 0,8 | 0% | 0% | 0,8 | 0% | 0% | 0% |
| 0,6 | 1,4 | 0% | 1% | 1,5 | 0% | 1% | 1% |
| 0,3 | 7,3 | 2% | 3% | 7,4 | 2% | 3% | 3% |
| 0,15 | 155,3 | 52% | 55% | 150,6 | 50% | 53% | 54% |
| 0,075 | 135,2 | 45% | 100% | 139,6 | 46% | 100% | 100% |
| Fundo | 1,3 | 0% | 100% | 1,2 | 0% | 100% | 100% |
| Soma | 301,3 | 100% | | 301,1 | 100% | | |

Diâmetro máximo 0,3 mm

Módulo de finura 0,58

Massa específica (g/cm³) 2,61 g/cm³

Caracterização do agregado miúdo – Areia de britagem:

| Peneiras # (mm) | Amostra 1 | | | Amostra 2 | | | Média |
|----------------------------|---------------------|-------------|----------------|---------------------|-------------|----------------|----------------|
| | Massa Retida (g) | % Retida | % Acumulada | Massa Retida (g) | % Retida | % Acumulada | % Acumulada |
| 6,3 | 1,3 | 0% | 0% | 0 | 0% | 0% | 0% |
| 4,75 | 2,3 | 1% | 1% | 4,8 | 1% | 1% | 1% |
| 2,36 | 50,5 | 17% | 18% | 71 | 20% | 22% | 20% |
| 1,18 | 78,2 | 26% | 44% | 90,2 | 26% | 47% | 46% |
| 0,6 | 42 | 14% | 58% | 49 | 14% | 61% | 60% |
| 0,3 | 42,5 | 14% | 72% | 45 | 13% | 74% | 73% |
| 0,15 | 33,8 | 11% | 84% | 36,8 | 11% | 85% | 84% |
| 0,075 | 24,2 | 8% | 92% | 26,1 | 7% | 92% | 92% |
| Fundo | 24,9 | 8% | 100% | 26,8 | 8% | 100% | 100% |
| Soma | 299,7 | 100% | | 349,7 | 100% | | |

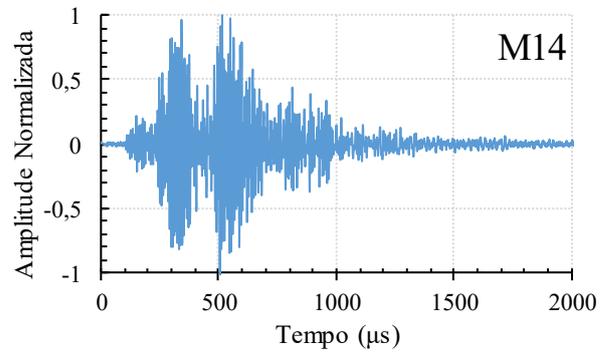
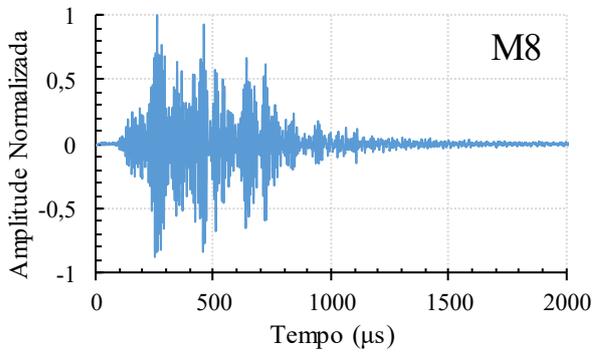
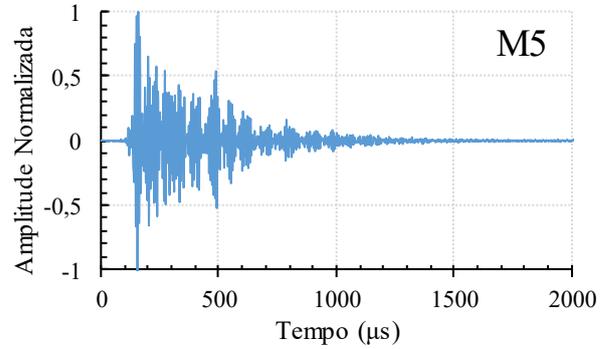
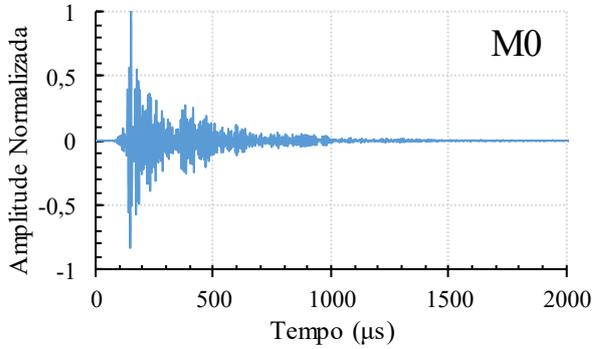
| | |
|------------------------|---------|
| Diâmetro máximo | 4,75 mm |
|------------------------|---------|

| | |
|-------------------------|------|
| Módulo de finura | 2,84 |
|-------------------------|------|

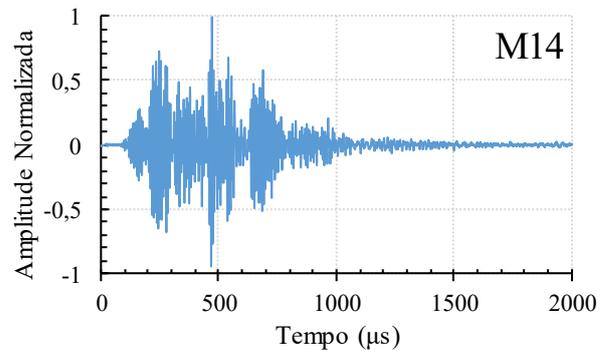
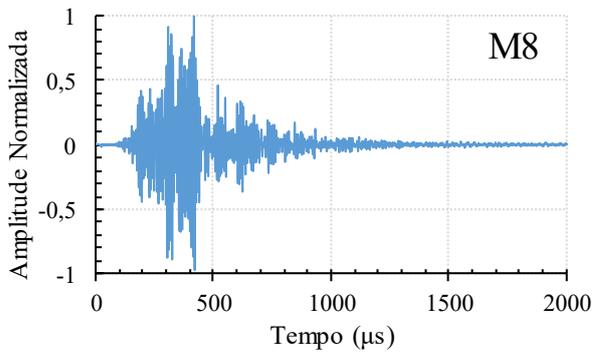
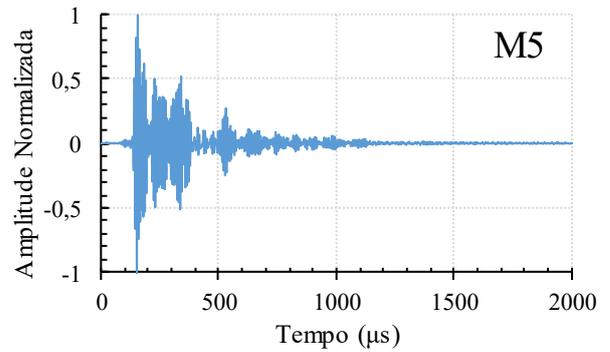
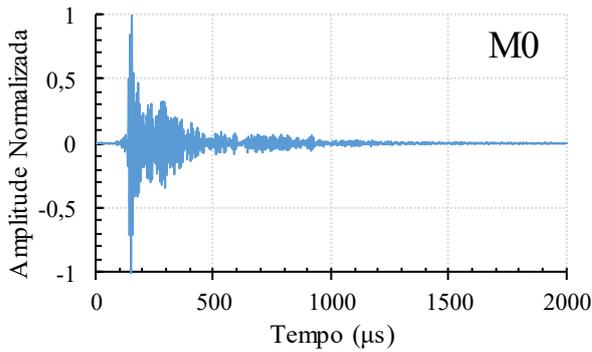
| | |
|--|------------------------|
| Massa específica (g/cm³) | 2,65 g/cm ³ |
|--|------------------------|

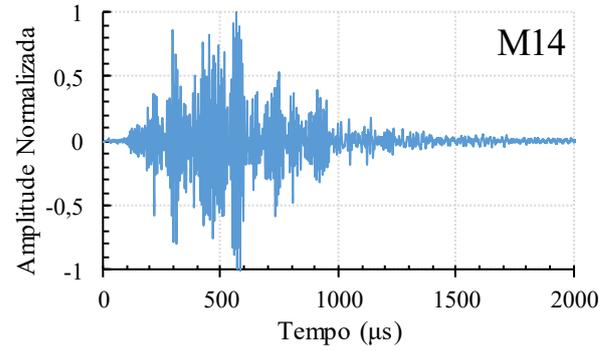
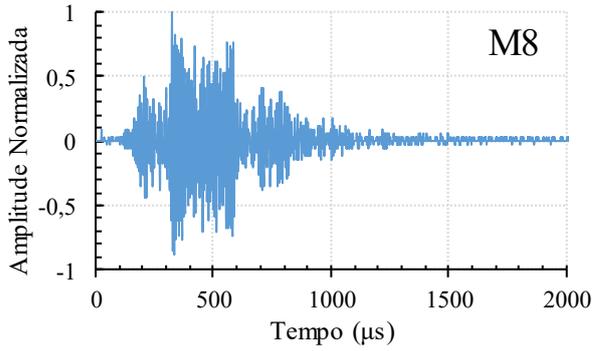
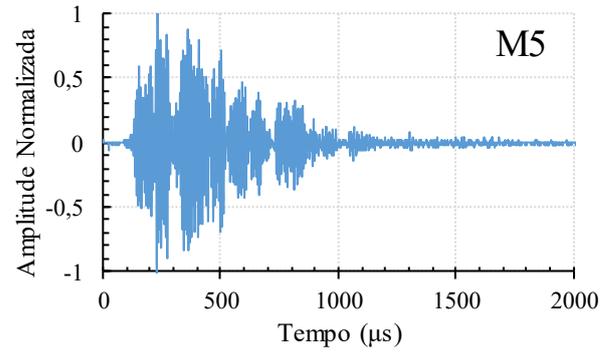
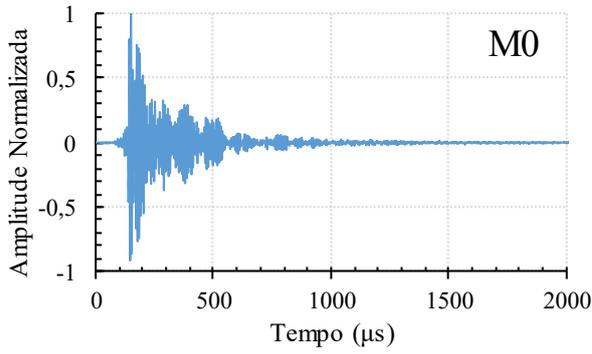
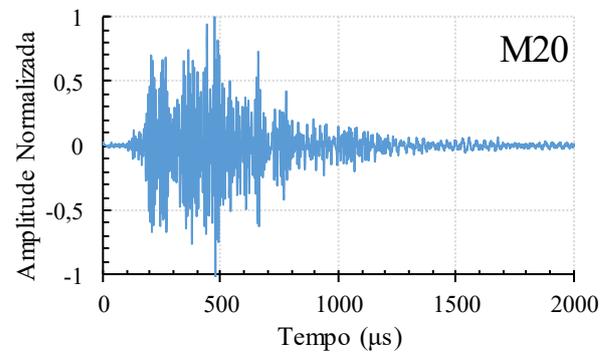
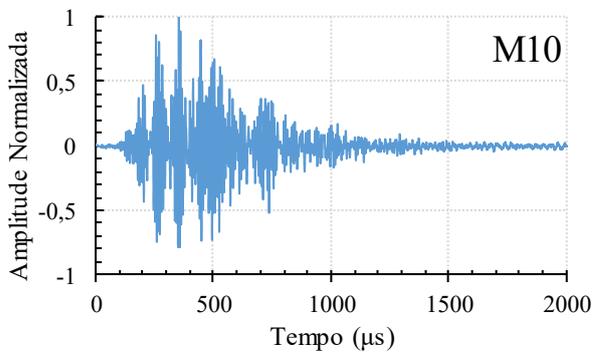
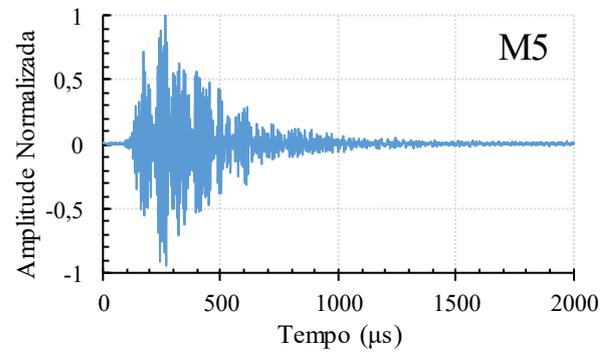
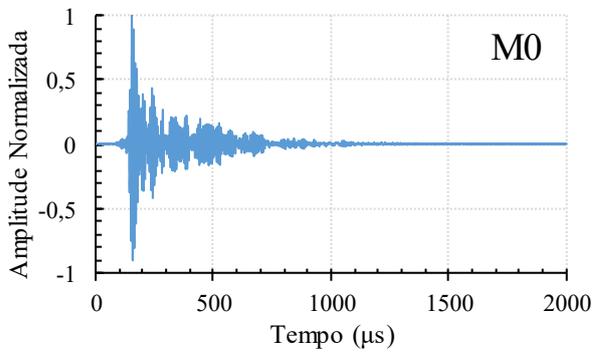
APÊNDICE B – Formatos de onda

V11

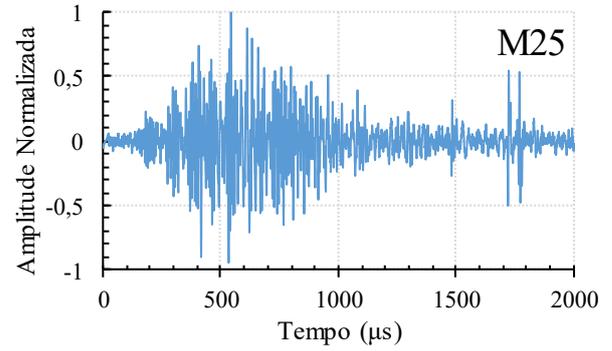
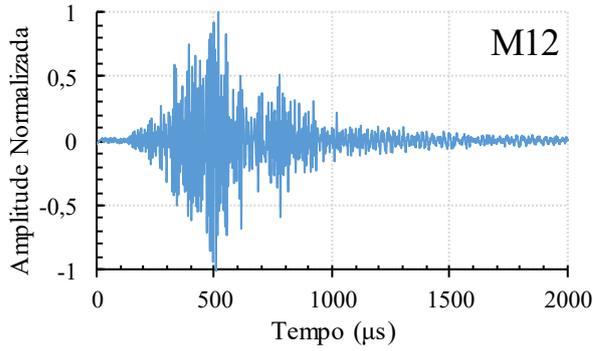
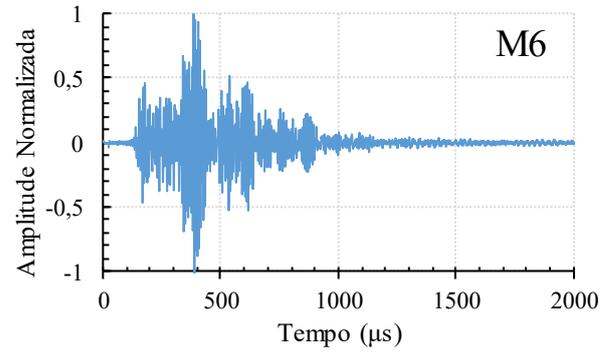
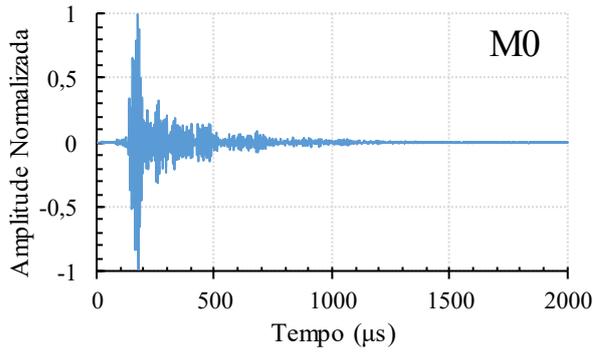


V12

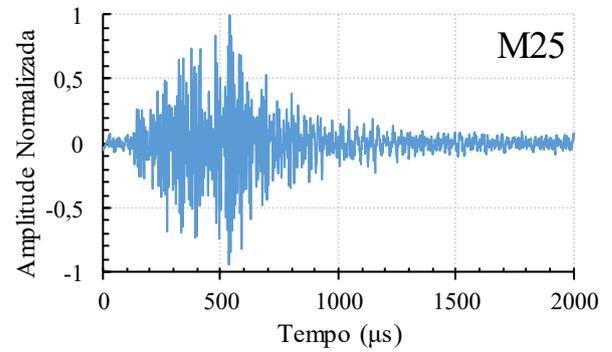
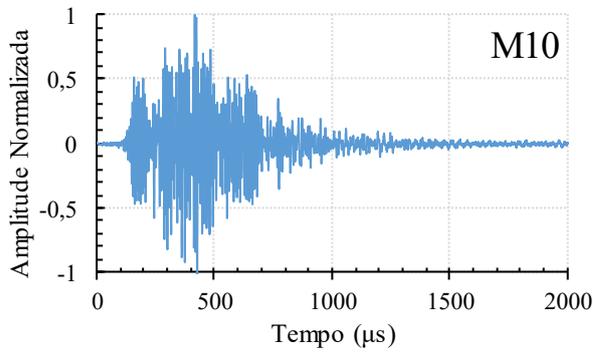
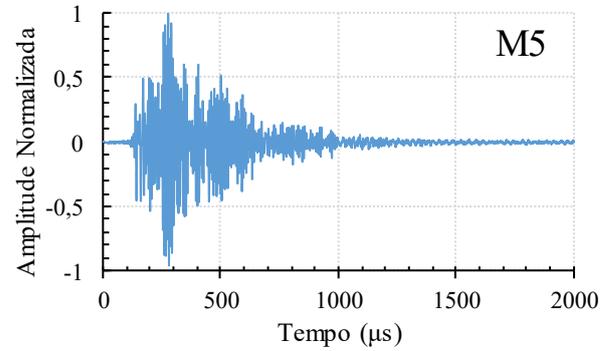
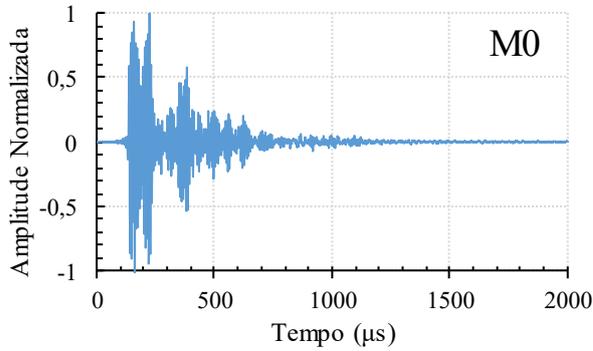


V13**V21**

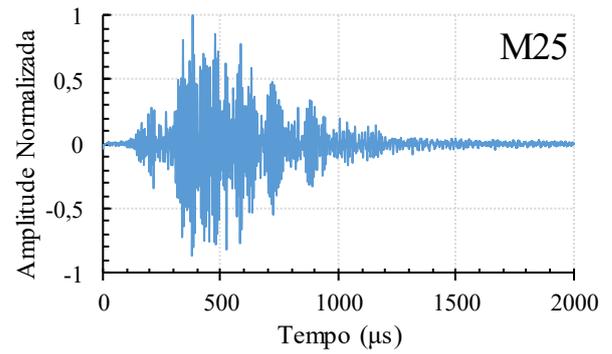
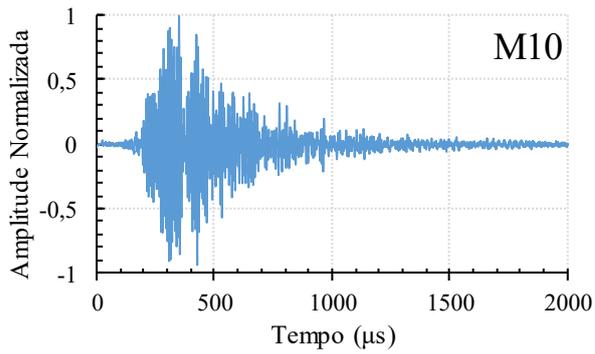
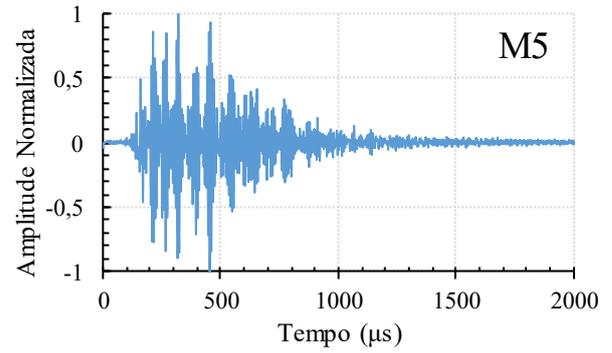
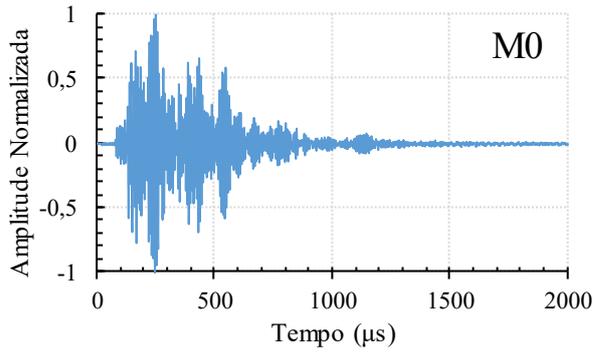
V22



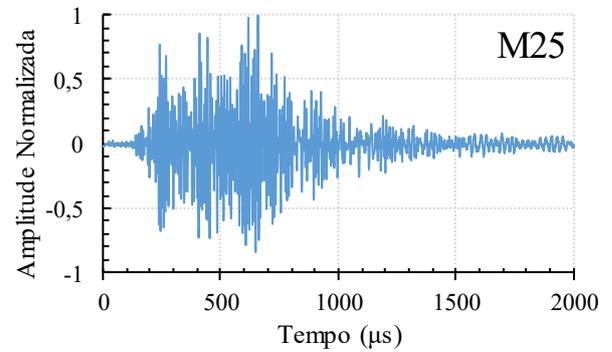
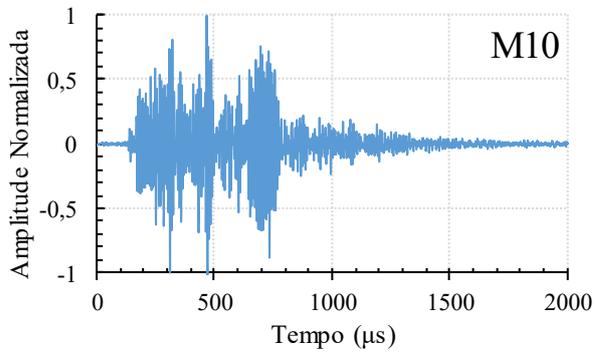
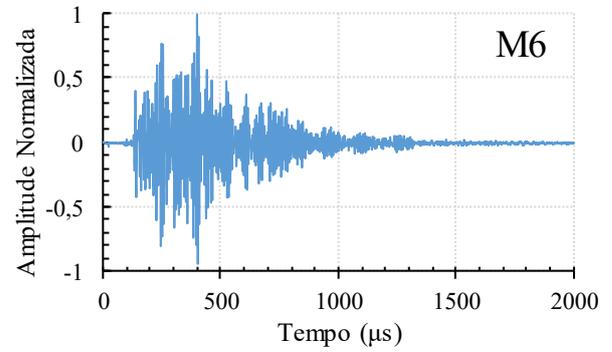
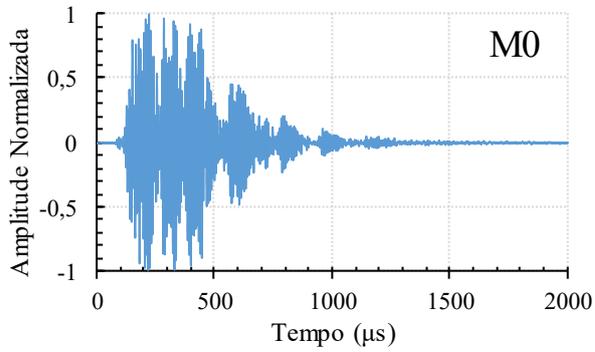
V23



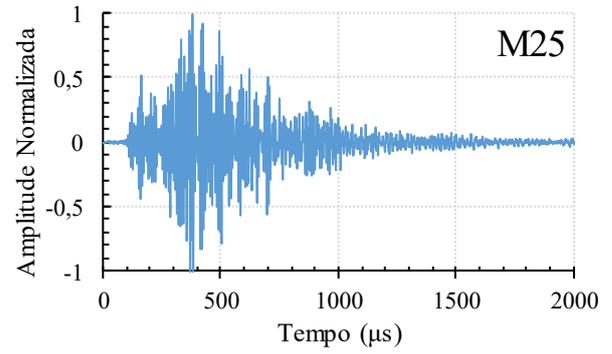
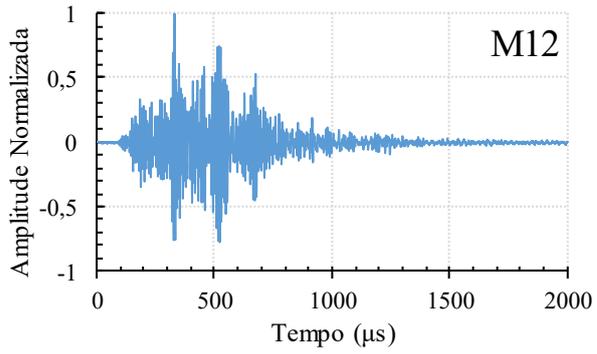
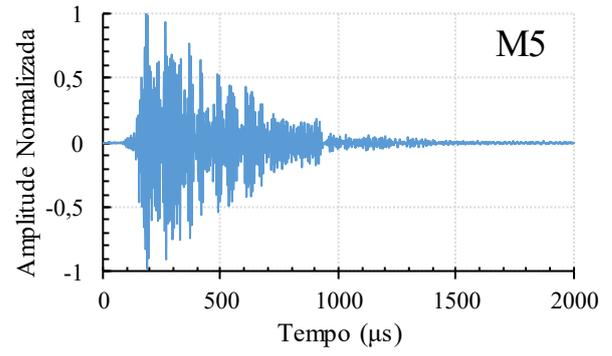
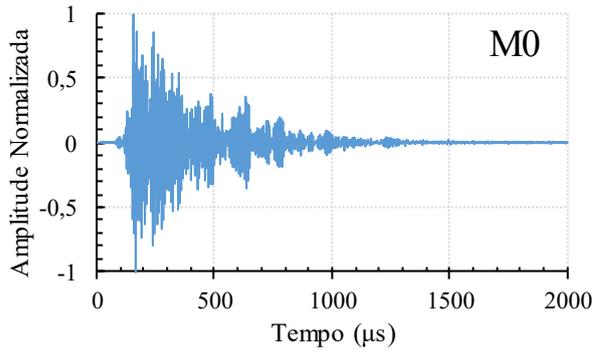
V31



V32



V33



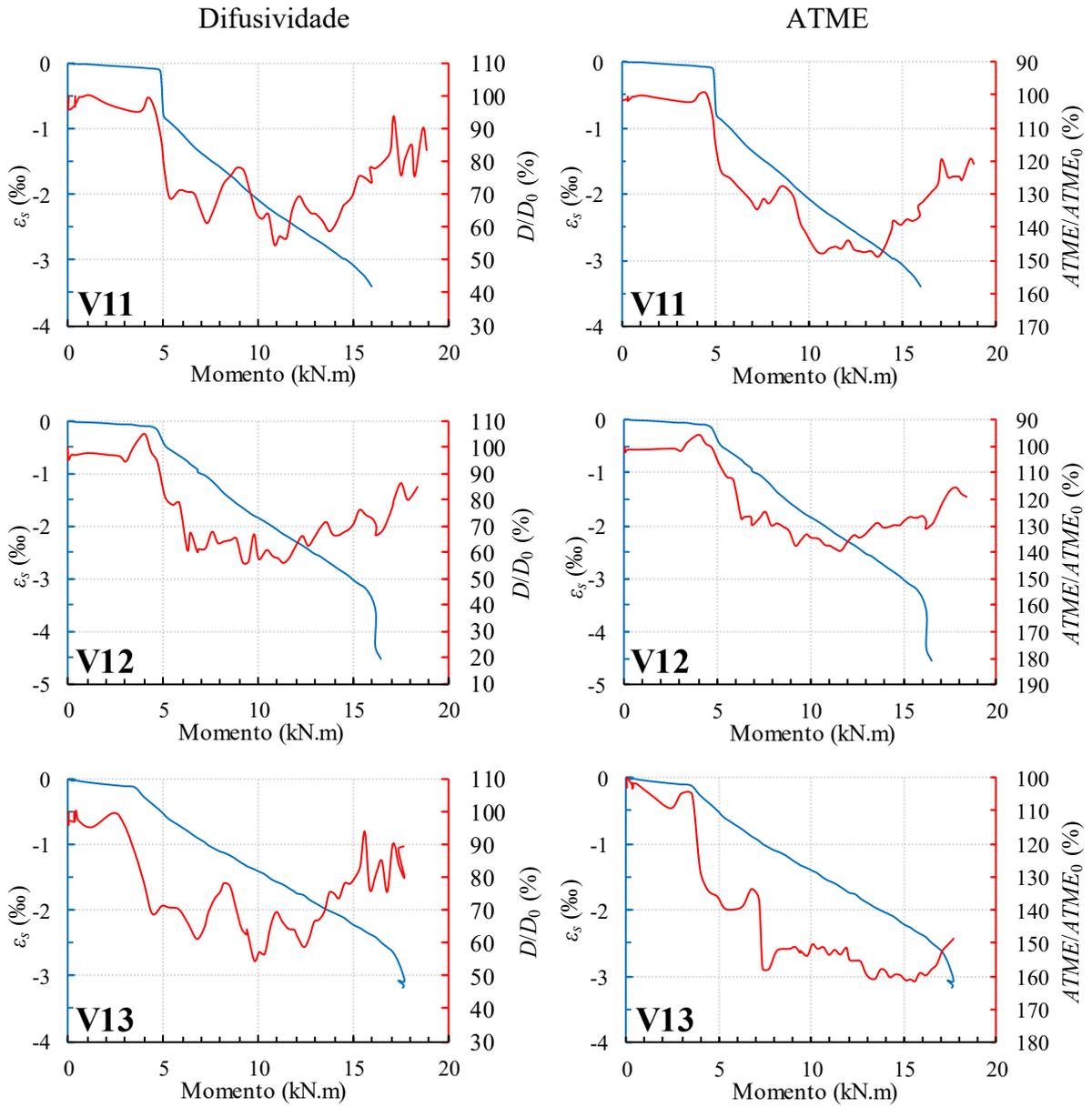
APÊNDICE C – Ganhos

| Leitura | Ganho | | | | | | | | |
|---------|-------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|
| | V11 | V12 | V13 | V21 | V22 | V23 | V31 | V32 | V33 |
| 1 | 20 | 20 | 10 | 20 | 20 | 50 | 50 | 50 | 20 |
| 2 | 20 | 20 | 10 | 20 | 20 | 50 | 50 | 50 | 20 |
| 3 | 20 | 20 | 10 | 20 | 20 | 50 | 50 | 50 | 20 |
| 4 | 20 | 20 | 10 | 20 | 26 | 50 | 100 | 50 | 20 |
| 5 | 20 | 20 | 10 | 20 | 20 | 50 | 100 | 50 | 20 |
| 6 | 20 | 20 | 10 | 20 | 20 | 50 | 100 | 50 | 20 |
| 7 | 20 | 20 | 10 | 20 | 20 | 50 | 100 | 50 | 20 |
| 8 | 20 | 20 | 10 | 20 | 20 | 50 | 100 | 50 | 20 |
| 9 | 20 | 20 | 10 | 20 | 50 | 50 | 100 | 50 | 20 |
| 10 | 20 | 20 | 10 | 20 | 100 | 50 | 100 | 20 | 20 |
| 11 | 20 | 20 | 10 | 20 | 100 | 50 | 200 | 20 | 20 |
| 12 | 20 | 20 | 10 | 50 | 100 | 50 | 200 | 20 | 50 |
| 13 | 20 | 20 | 10 | 50 | 200 | 100 | 200 | 20 | 50 |
| 14 | 20 | 20 | 10 | 50 | 200 | 100 | 200 | 20 | 50 |
| 15 | 20 | 20 | 10 | 50 | 200 | 100 | 200 | 20 | 50 |
| 16 | 20 | 20 | 10 | 100 | 200 | 100 | 200 | 20 | 50 |
| 17 | 20 | 20 | 10 | 100 | 200 | 100 | 200 | 50 | 50 |
| 18 | 20 | 20 | 10 | 200 | 200 | 100 | 200 | 50 | 50 |
| 19 | 50 | 20 | 10 | 200 | 500 | 100 | 200 | 50 | 50 |
| 20 | 100 | 20 | 10 | 200 | 500 | 100 | 200 | 50 | 50 |
| 21 | 100 | 20 | 10 | 200 | 500 | 100 | 200 | 50 | 50 |
| 22 | 100 | 20 | 10 | 200 | 500 | 100 | 200 | 100 | 50 |
| 23 | 100 | 50 | 10 | 200 | 500 | 200 | 200 | 100 | 50 |
| 24 | 100 | 20 | 10 | 200 | 500 | 200 | 200 | 100 | 50 |
| 25 | 100 | 20 | 10 | 200 | 500 | 200 | 200 | 100 | 50 |
| 26 | 100 | 50 | 10 | 200 | 500 | 200 | 200 | 100 | 100 |
| 27 | 100 | 50 | 10 | 200 | 500 | 200 | 200 | 100 | 100 |
| 28 | 200 | 100 | 10 | 500 | 500 | 200 | 200 | 100 | 100 |
| 29 | 200 | 100 | 10 | 500 | 500 | 200 | 200 | 100 | 100 |
| 30 | 200 | 100 | 10 | 500 | 500 | 200 | 500 | 100 | 100 |
| 31 | 200 | 100 | 10 | 500 | 500 | 200 | 500 | 200 | 100 |
| 32 | 200 | 100 | 10 | 500 | 500 | 200 | 500 | 200 | 100 |
| 33 | 200 | 100 | 100 | 500 | 500 | 200 | 500 | 200 | 100 |
| 34 | 200 | 100 | 200 | 200 | 500 | 200 | 500 | 200 | 100 |
| 35 | 200 | 100 | 200 | 200 | 500 | 200 | 500 | 200 | 100 |
| 36 | 200 | 100 | 200 | 200 | 500 | 200 | 500 | 200 | 100 |
| 37 | 200 | 100 | 200 | 200 | 500 | 200 | 500 | 200 | 100 |
| 38 | 200 | 100 | 200 | 200 | 1000 | 200 | 500 | 200 | 100 |
| 39 | 500 | 100 | 200 | 200 | 1000 | 200 | 500 | 200 | 100 |
| 40 | 200 | 100 | 200 | 200 | 1000 | 500 | 500 | 200 | 100 |
| 41 | 500 | 100 | 200 | 200 | 1000 | 500 | 500 | 200 | 100 |
| 42 | 500 | 100 | 200 | 200 | 1000 | 500 | 500 | 200 | 100 |
| 43 | 500 | 100 | 500 | 200 | 1000 | 200 | 500 | 200 | 100 |
| 44 | 200 | 100 | 500 | 200 | 1000 | 200 | 1000 | 200 | 100 |

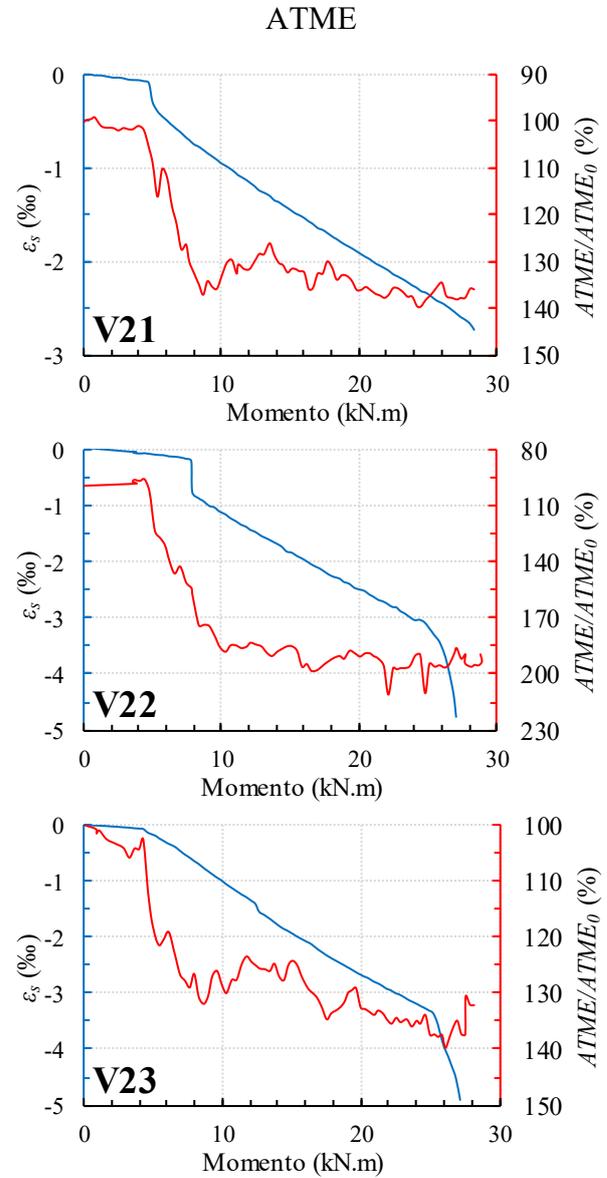
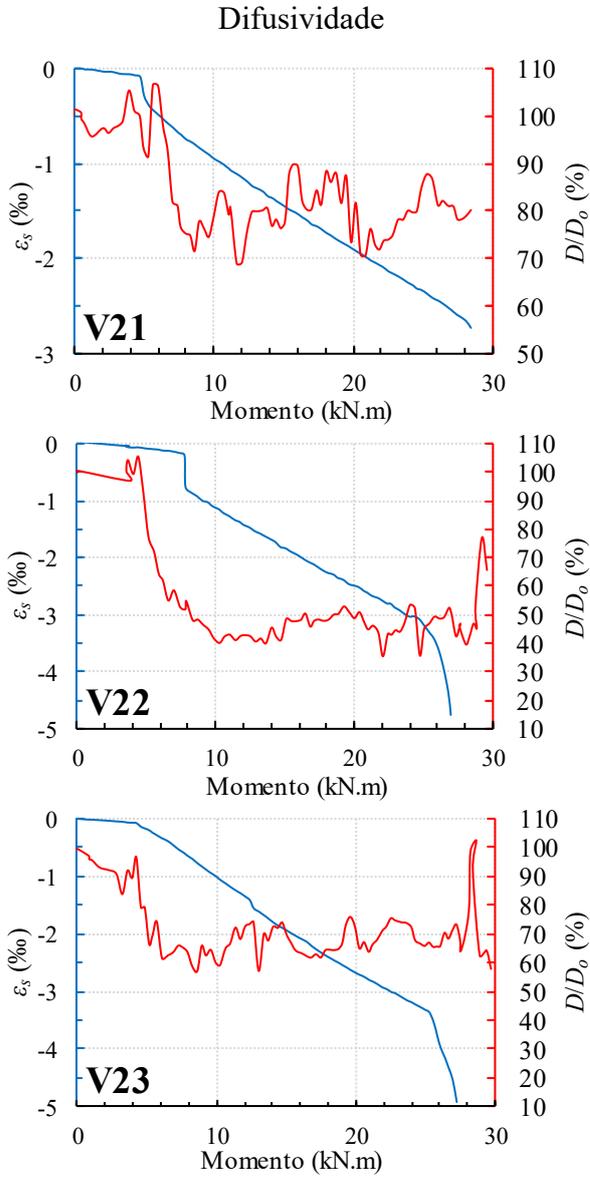
| Leitura | Ganho | | | | | | | | |
|---------|-------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|
| | V11 | V12 | V13 | V21 | V22 | V23 | V31 | V32 | V33 |
| 45 | 200 | 100 | 500 | 200 | 1000 | 200 | 1000 | 200 | 100 |
| 46 | 200 | 100 | 500 | 200 | 1000 | 200 | 1000 | 200 | 100 |
| 47 | 500 | 100 | 500 | 200 | 1000 | 200 | 1000 | 200 | 100 |
| 48 | 500 | 100 | 500 | 200 | 1000 | 200 | 500 | 200 | 100 |
| 49 | 500 | 200 | 500 | 100 | 1000 | 200 | 500 | 200 | 100 |
| 50 | 200 | 200 | 500 | 500 | 1000 | 500 | 200 | 200 | 100 |
| 51 | 200 | 200 | 500 | 500 | 1000 | 500 | 200 | 200 | 200 |
| 52 | 200 | 200 | 500 | 500 | 1000 | 500 | 200 | 200 | 200 |
| 53 | 500 | 200 | 500 | 500 | 1000 | 500 | 200 | 200 | 200 |
| 54 | 500 | 200 | 500 | 500 | 1000 | 500 | 200 | 200 | 200 |
| 55 | 500 | 200 | 500 | 500 | 1000 | 500 | 200 | 200 | 200 |
| 56 | 500 | 200 | 500 | 500 | 1000 | 500 | 200 | 200 | 200 |
| 57 | 500 | 200 | 500 | 500 | 1000 | 500 | 200 | 200 | 200 |
| 58 | 500 | 200 | 500 | 500 | 1000 | 500 | 200 | 500 | 200 |
| 59 | 500 | 200 | 200 | 500 | 1000 | 500 | 200 | 500 | 200 |
| 60 | 500 | 200 | 200 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 61 | 500 | 200 | 200 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 62 | 500 | 200 | 200 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 63 | 500 | 200 | 200 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 64 | 200 | 200 | 200 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 65 | 200 | 200 | 200 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 66 | 200 | 200 | 200 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 67 | 200 | 200 | 200 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 68 | 200 | 200 | 200 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 69 | 200 | 200 | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 70 | 200 | 200 | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 71 | - | 200 | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 72 | - | 200 | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 73 | - | 200 | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 74 | - | 500 | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 75 | - | 500 | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 76 | - | - | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 77 | - | - | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 78 | - | - | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 79 | - | - | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 80 | - | - | - | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 81 | - | - | - | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 82 | - | - | - | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 83 | - | - | - | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 84 | - | - | - | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 85 | - | - | - | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 86 | - | - | - | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 87 | - | - | - | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |
| 88 | - | - | - | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 500 | 200 |

APÊNDICE D – Gráficos comparativos entre a deformação do aço e os parâmetros de difusividade e ATME

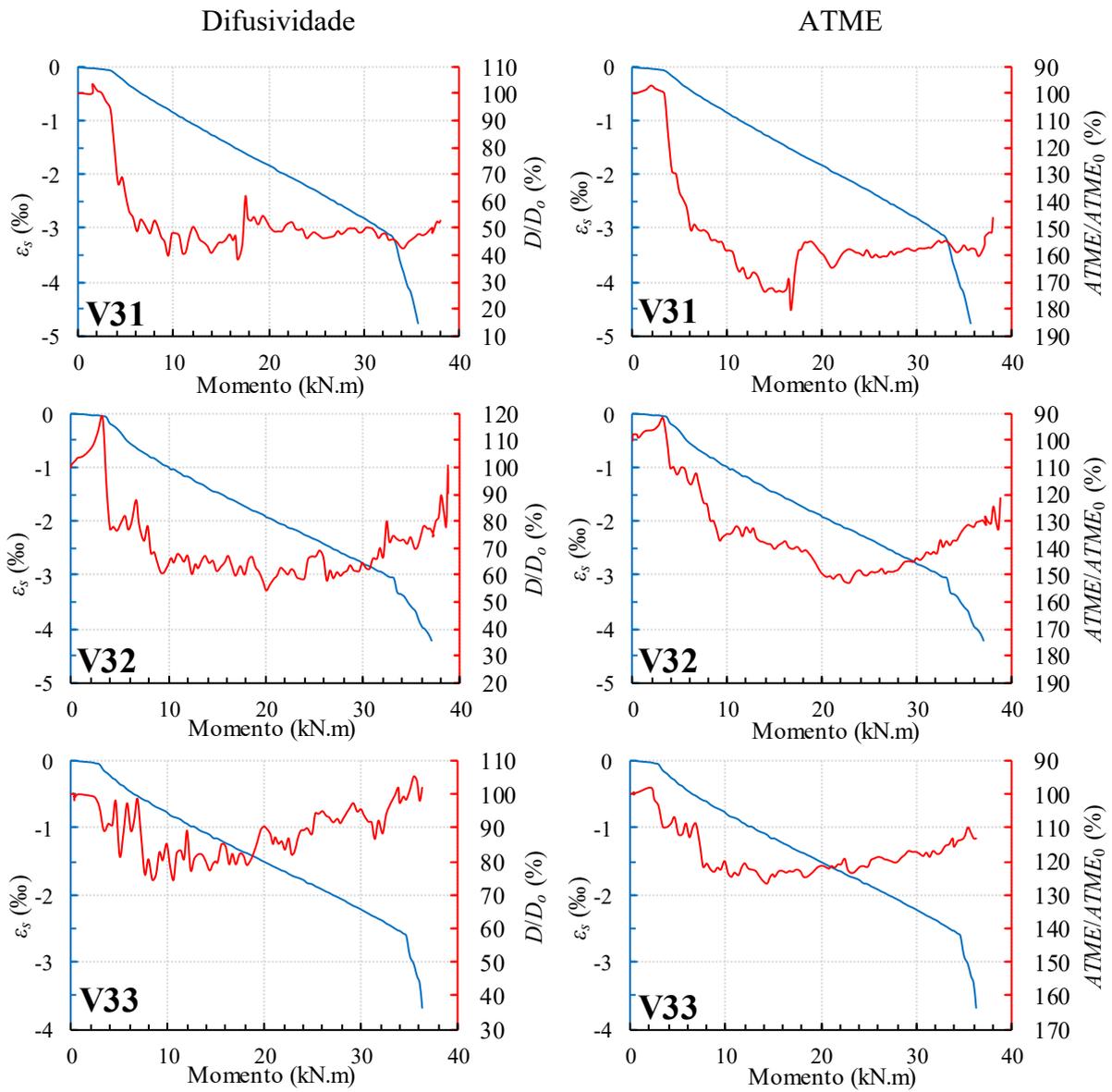
Lote L1



Lote L2

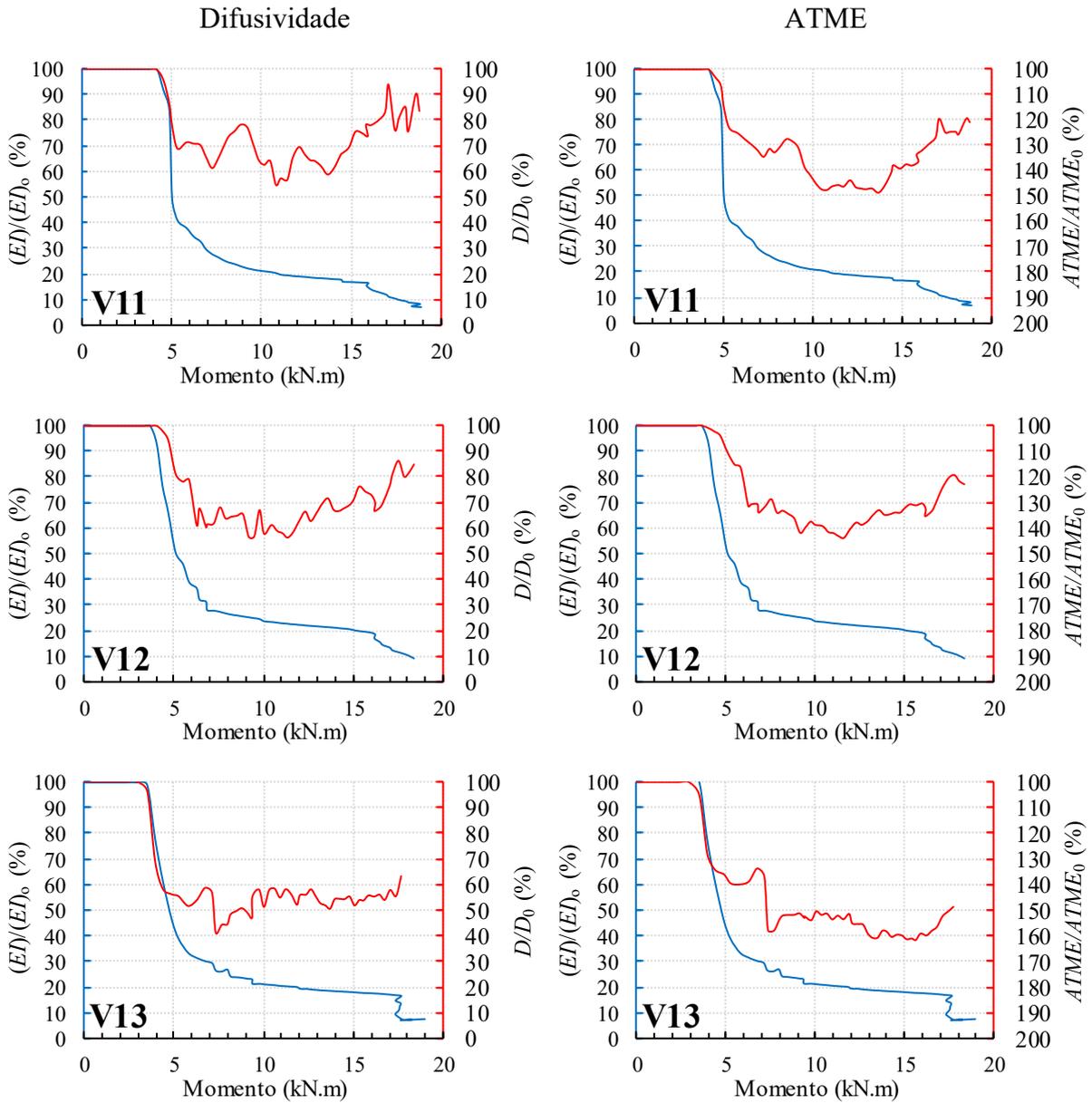


Lote L3



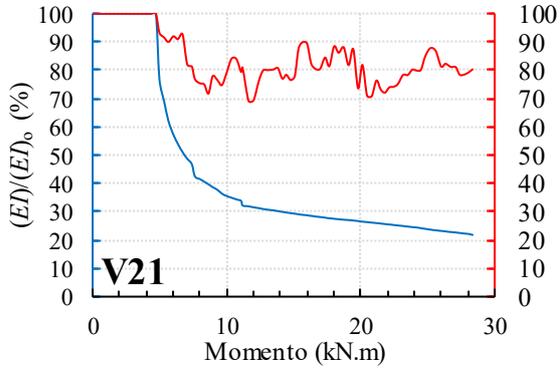
APÊNDICE E – Gráficos comparativos entre a perda de rigidez e os parâmetros de difusividade e ATME

Lote L1

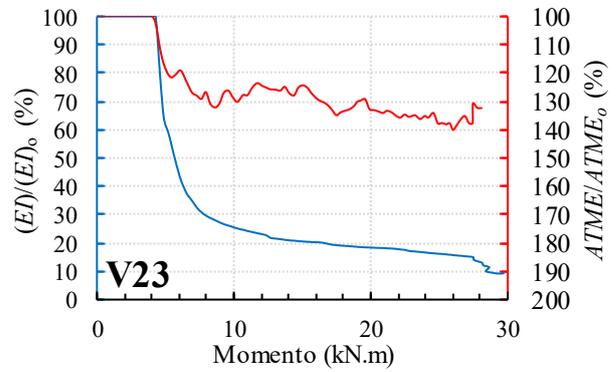
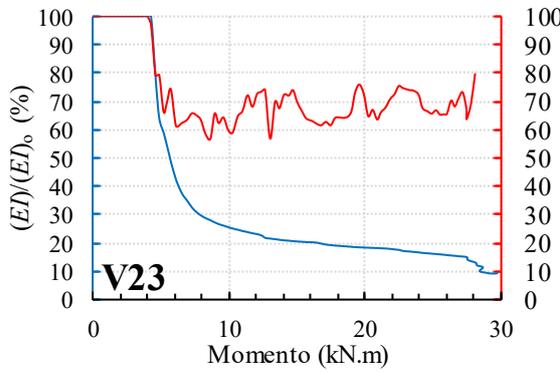
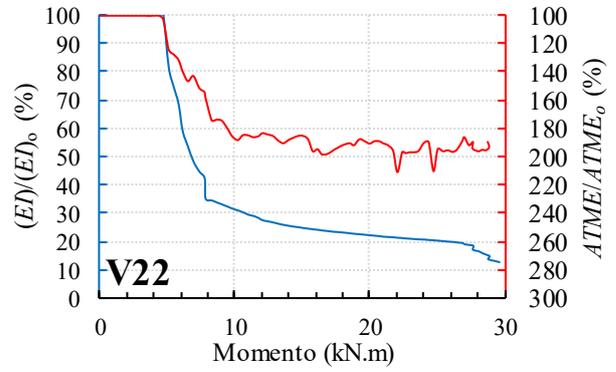
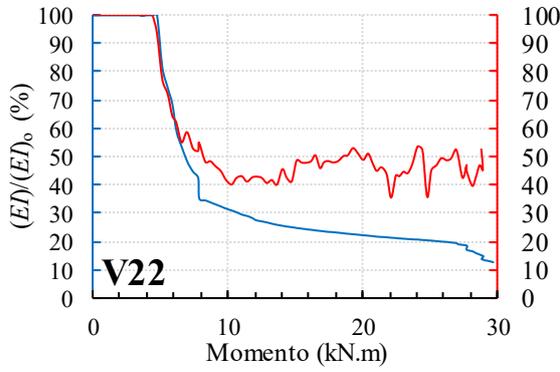
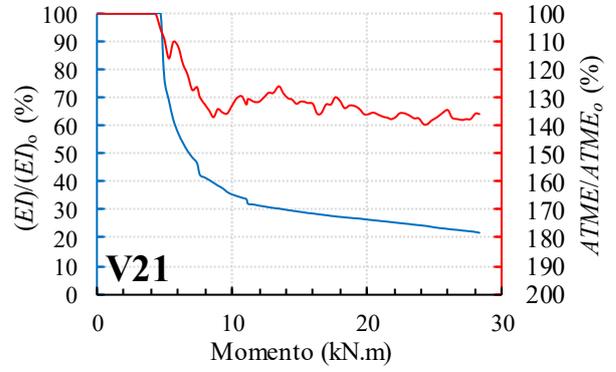


Lote L2

Difusividade



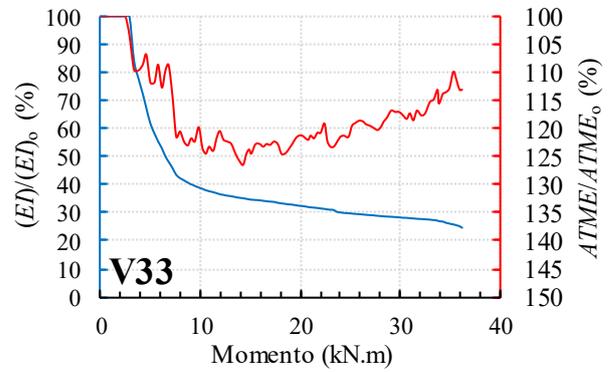
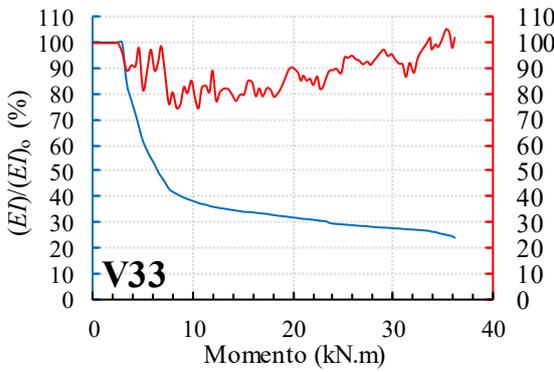
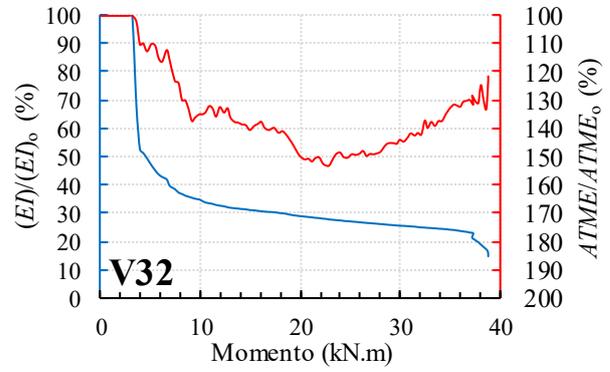
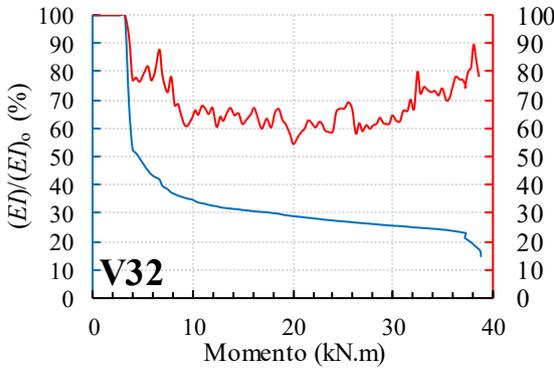
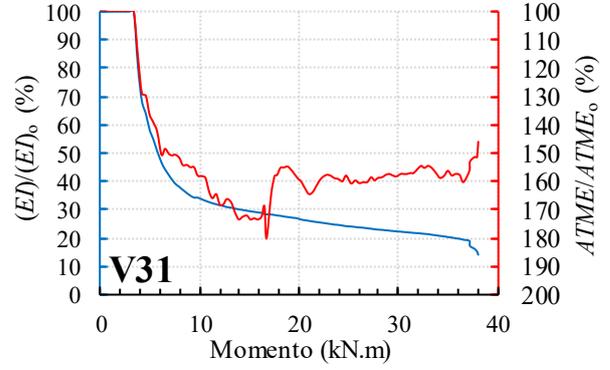
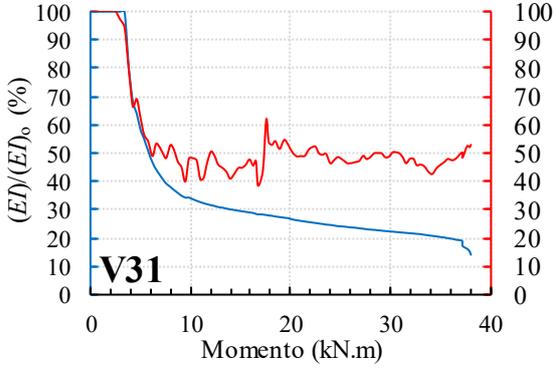
ATME



Lote L3

Difusividade

ATME



**APÊNDICE F – Análise de dispersão dos parâmetros de difusão dos ensaios
preliminares**

| Utilização do cone | Distância entre Transdutores (cm) | Difusividade (m ² /s) | | | | |
|-----------------------|---|----------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|--------|
| | | Média | Valor Mínimo | Valor Máximo | Desvio Padrão | CV (%) |
| SC | 10 | 11,7 | 11,1 | 12,7 | 0,48 | 4,10 |
| | 20 | 23,0 | 21,2 | 23,9 | 1,18 | 5,13 |
| | 30 | 33,2 | 28,8 | 38,0 | 3,06 | 9,24 |
| | 40 | 38,9 | 36,9 | 40,5 | 1,39 | 3,58 |
| | 50 | 39,2 | 37,0 | 46,0 | 3,04 | 7,76 |
| CC | 10 | 12,5 | 10,8 | 14,0 | 1,31 | 10,41 |
| | 20 | 19,8 | 19,4 | 21,1 | 0,51 | 2,57 |
| | 30 | 25,9 | 23,9 | 27,5 | 1,10 | 4,23 |
| | 40 | 35,9 | 35,4 | 36,6 | 0,44 | 1,24 |
| | 50 | 34,3 | 32,4 | 35,6 | 1,07 | 3,11 |

| Utilização do cone | Distância entre Transdutores (cm) | Dissipação (ms ⁻¹) | | | | |
|-----------------------|---|--------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|--------|
| | | Média | Valor Mínimo | Valor Máximo | Desvio Padrão | CV (%) |
| SC | 10 | 6,12 | 5,48 | 6,51 | 0,330 | 5,39 |
| | 20 | 5,36 | 5,10 | 5,89 | 0,349 | 6,51 |
| | 30 | 4,74 | 4,11 | 5,59 | 0,493 | 10,40 |
| | 40 | 4,94 | 4,71 | 5,34 | 0,239 | 4,83 |
| | 50 | 5,52 | 4,33 | 5,94 | 0,546 | 9,90 |
| CC | 10 | 6,69 | 6,32 | 7,25 | 0,256 | 3,83 |
| | 20 | 6,24 | 6,05 | 6,39 | 0,132 | 2,11 |
| | 30 | 6,96 | 6,61 | 7,19 | 0,171 | 2,46 |
| | 40 | 5,94 | 5,83 | 6,08 | 0,080 | 1,35 |
| | 50 | 7,05 | 6,80 | 7,49 | 0,242 | 3,43 |

| Utilização do cone | Distância entre Transdutores (cm) | ATME (μ s) | | | | |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------|--------------|--------------|---------------|--------|
| | | Média | Valor Mínimo | Valor Máximo | Desvio Padrão | CV (%) |
| SC | 10 | 100,4 | 96,5 | 103,5 | 1,99 | 1,98 |
| | 20 | 178,1 | 173,5 | 184,0 | 3,71 | 2,08 |
| | 30 | 253,0 | 240,0 | 271,5 | 10,31 | 4,08 |
| | 40 | 329,6 | 324,0 | 334,5 | 3,38 | 1,03 |
| | 50 | 420,6 | 411,5 | 425,5 | 4,72 | 1,12 |
| CC | 10 | 94,4 | 86,0 | 103,5 | 7,23 | 7,66 |
| | 20 | 188,6 | 184,0 | 191,0 | 2,36 | 1,25 |
| | 30 | 261,7 | 257,5 | 271,5 | 5,17 | 1,97 |
| | 40 | 324,7 | 324,0 | 327,5 | 1,48 | 0,45 |
| | 50 | 412,4 | 408,0 | 418,5 | 4,08 | 0,99 |

| Utilização do cone | Distância entre Transdutores (cm) | P_0 (V^2/Hz) | | | | |
|--------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------|--------------|---------------|--------|
| | | Média | Valor Mínimo | Valor Máximo | Desvio Padrão | CV (%) |
| SC | 10 | 0,0014 | 0,0010 | 0,0016 | 0,00020 | 14,74 |
| | 20 | 0,0174 | 0,0141 | 0,0237 | 0,00406 | 23,35 |
| | 30 | 0,0684 | 0,0374 | 0,1202 | 0,02666 | 38,97 |
| | 40 | 0,3327 | 0,2647 | 0,4511 | 0,07259 | 21,82 |
| | 50 | 4,3096 | 1,2190 | 5,6857 | 1,63911 | 38,03 |
| CC | 10 | 0,0011 | 0,0010 | 0,0013 | 0,00008 | 6,76 |
| | 20 | 0,0211 | 0,0173 | 0,0259 | 0,00248 | 11,76 |
| | 30 | 0,2781 | 0,2078 | 0,3384 | 0,03505 | 12,60 |
| | 40 | 1,7205 | 1,5630 | 1,8842 | 0,09338 | 5,43 |
| | 50 | 29,8224 | 23,0170 | 41,9067 | 6,30213 | 21,13 |

ANEXO A – Laudo Técnico do Cimento



LAUDO TÉCNICO
TYPICAL ANALYSIS BULLETIN | BULLETIN D'ANALYSE TYPE

REFERÊNCIA Cimento Portland
REFERENCE Portland Cement | Ciment Portland
FÁBRICA Adrianópolis
PLANT | USINE

CP V ARI

DATA DE EMISSÃO 01/02/2018
DATE

DATA DE ANÁLISE 05/12/2017 a 28/12/2017
PRODUCTION DATE | DATE DE PRODUCTION

ENSAIOS MECÂNICOS NORMA
MECHANICAL TESTS | ESSAIS MECANIQUE NBR 5733

| IDADE AGE | Resistência à Compressão Compressive Strength Résistance à la Compression | | |
|-------------------------|--|-------|------|
| 1 dia day jour | MPa | 26,80 | ≥ 14 |
| 3 dias days jours | MPa | 37,96 | ≥ 24 |
| 7 dias days jours | MPa | 43,77 | ≥ 34 |
| 28 dias days jours | MPa | 50,25 | -- |

ANÁLISE QUÍMICA NORMA
CHEMICAL ANALYSIS | ANALYSE CHIMIQUE NBR 5733

| | | | | |
|---|---|--------------------------------|-------|-------|
| Perda ao Fogo Loss on Ignition Perte au Feu | % | -- | 3,23 | ≤ 4,5 |
| Resíduo Insolúvel Insoluble Residue Résidu Insoluble | % | -- | 0,91 | ≤ 1,0 |
| Óxido de Silício Silicon Oxide Oxyde de Silicium | % | SiO ₂ | 18,06 | |
| Óxido de Alumínio Aluminium Oxide Oxyde de Aluminium | % | Al ₂ O ₃ | 4,33 | |
| Óxido de Ferro Ferric Oxide Oxide de Fer | % | Fe ₂ O ₃ | 2,73 | |
| Óxido de Cálcio Calcium Oxide Oxyde de Calcium | % | CaO | 59,43 | |
| Óxido de Magnésio Magnesium Oxide Oxyde de Magnésium | % | MgO | 6,39 | ≤ 6,5 |
| Sulfatos Sulfates Sulfates | % | SO ₃ | 2,92 | ≤ 3,5 |
| Óxido de Potássio Potassium Oxide Oxyde de Potassium | % | K ₂ O | 0,98 | |
| Óxido de Sódio Sodium Oxide Oxyde de Sodium | % | Na ₂ O | 0,22 | |
| Cloretos Chloride Chlorures | % | Cl ⁻ | 0,01 | |
| Anidrido Carbônico Carbon dioxide Dioxyde de Carbon | % | CO ₂ | 2,15 | ≤ 3,0 |
| Cal Livre Free Lime Chaux Libre | % | | 0,41 | |
| Fator de Saturação da Cal Lime Saturation Factor Depot de Chaux | | | 103,4 | |
| Módulo de Silica Silica Ratio Indice Silicieux | | | 2,6 | |
| Módulo de Alumina Alumina-iron Ratio Indice Alumineux | | | 1,6 | |

ENSAIOS FÍSICOS NORMA
PHYSICAL TESTS | ESSAIS PHYSIQUES NBR 5733

| | | | |
|--|----------------------------------|-------|--------|
| Massa Específica (g/cm³) Specific Weight Masse Volumique | | 3,14 | |
| Peso Litro (g/l) Bulk Density Densité Apparent | | NA | |
| Resíduo de Peneiração (%) Sieve Residue Residue de Tamisage | 90 µm | | |
| | 75 µm | 0,00 | ≤ 6,0 |
| | 45 µm | 0,45 | |
| | 32 µm | 4,31 | |
| Sup. Específica de Blaine (cm²/g) Blaine Spec. Surface Surface spécif. Blaine | | 4458 | ≥ 3000 |
| Água na Pasta Normal (%) Water Demand Eau de Gâchage | | 28,72 | |
| Tempo de Pega (min) Setting Time Temps de Prise | Início Initial Debut | 203 | ≥ 60 |
| | Fim Final Fin | 254 | ≤ 600 |
| Expansibilidade (mm) Soundness Expansion | | 0,30 | ≤ 5,0 |

ANÁLISE MINERALÓGICA
MINEROLOGICAL ANALYSIS | ANALYSE MINÉRALOGIQUE XRD Bogue

| | | | | |
|--|---|------|-------|-------|
| Silicato Tricálcico Tricalcium Silicate Silicate Tricalcique | % | C3S | 59,73 | 61,58 |
| Silicato Bicálcico Dicalcium Silicate Silicate Bicalcique | % | C2S | 9,87 | 5,29 |
| Aluminato Tricálcico Tricalcium Aluminate Aluminate Tricalcique | % | C3A | 3,25 | 6,87 |
| Ferro-aluminato Tetracálcico Tetracalcium Aluminoferrite Ferraluminat Tetracalcique | % | C4AF | 9,64 | 8,29 |

Obs.

APROVADO
APPROVED | APPROVÉ

ANEXO B – Especificações dos extensômetros

| KYOWA | | MADE IN JAPAN | |
|------------------------------|---------------|---|---------------|
| TYPE KC-80-120-A1-11 | | | |
| GAGE FACTOR (24°C, 50%RH) | 2.13 ± 1.0 % | LOT No. Y8001 | BATCH 155A |
| GAGE LENGTH | 84 mm | TEMPERATURE COEFFICIENT OF GAGE FACTOR | +0.015 %/°C |
| GAGE RESISTANCE(24°C, 50%RH) | 120.2 ± 0.2 Ω | APPLICABLE GAGE CEMENT | CC-35, PC-12B |
| ADOPTABLE THERMAL EXPANSION | 10.8 PPM/°C | QUANTITY | 10 |

KYOWA STRAIN GAGES

共和ひずみゲージのお取扱いは裏面をご覧ください。
See the back of package for installation of Kyowa strain gages.



株式会社 共和電業
〒182-8520 東京都調布市調布ヶ丘3-5-1
TEL : 042-488-1111(大代) FAX : 042-481-3258
URL : http://www.kyowa-ei.co.jp

KYOWA
KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.
3-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8520, Japan
Phone : +81-42-488-1111, Fax : +81-42-481-3258
URL : http://www.kyowa-ei.com

X08



紙
表紙, 台紙

紙
外袋 : PP
ゲージ保護シート : PET
接着用フィルム : PE

<ひずみゲージの接着から測定まで>
*接着手順の詳細については、適用する接着剤の取扱説明書を参照して下さい。

ひずみゲージの接着面
●光沢の無い側が裏面(接着面)になります。金属箔(素子部)とゲージリード接続部が見えて、光が反射する側が表面(非接着面)になります。

- ひずみゲージの取り出し
 - 包装を開け、ゲージ保護シートからひずみゲージをピンセット等で取り出します。
 - 素手でゲージベースには触れないでゲージリードを持って取り扱って下さい。
- 被測定物の表面処理
 - 被測定物のゲージ接着部分の研磨と脱脂処理を行い接着に適した状態にします。
 - 正しい位置に接着するために接着位置目標となるケガキ線を入れます。
- ゲージ接着
 - この包装の表面に記載された接着剤を使用します。
 - 接着剤に添付されている取扱説明書に従って、ひずみゲージの接着(加圧、キュアリング、エージング)を行います。
- 接着状態のチェック
 - ひずみゲージの接着状態を確認し、抵抗値と絶縁チェックを行います。
- ゲージ配線
 - 測定条件に合わせてゲージリードをゲージ端子にはんだ付けで接続します。
- 防湿処理
 - 測定条件に合わせてコーティング剤を測定して、防湿処理を行います。
- 測定器への接続
 - リード線を測定器に接続します。
 - 以上で測定が可能となります。

注1) リード線付ゲージは、5項を除く。
注2) 開封したひずみゲージはデシケータなどの乾燥した環境で保存して下さい。

<2線式結線法でのリード線の温度影響>
・2線式結線法でリード線の温度が変化した場合、リード線による零点変動が生じます。
・3線式結線法の場合は、リード線の温度影響は非常に小さくなります。

<Handling Procedures for Strain Gage from Bonding to Measurement>
* For details of strain gage bonding procedures, see the instruction manual of the adhesives applied.

Bonding Face of the Strain Gage
●Note that light reflecting side with metallic foil (sensing element) and gage lead connected portion observed is the front surface (unbonding face). Lusterless side is the rear side (bonding face).

- Unpacking and Taking Out the Strain Gage
 - Open the package and take out the strain gage from a gage protection sheet with tweezers, etc.
 - Do not touch the gage with bare hands. Always handle the gage by holding the gage lead.
- Bonding Face of the Strain Gage
 - Polish and remove grease from the gage bonding portion of the measuring object to have the sufficient bonding surface.
 - To bond the strain gage at a proper place, draw a mark-off line to be an indication of the bonding portion.
- Bonding the Gage
 - Use the adhesives written on the front of the package.
 - Bond the strain gage (by pressurizing, curing, and aging) according to the instruction manual attached to the adhesives.
- Checking the Gage Bonding State
 - Check bonding state of the strain gage. Check resistance value and insulation.
- Gage Wiring
 - Connect the gage lead to a gage terminal by soldering according to measuring conditions.
- Moistureproofing
 - Select an appropriate moistureproof coating material according to measuring conditions.
- Connecting to Measuring Instrument
 - Connect the leadwire to the measuring instrument.
 - Now, it is ready for measurement.

Note 1) Omit the item 5) for the leadwire attached gage.
Note 2) After taking out the strain gages from the package, store them in a dry environment such as desiccator when not in use.

< Temperature Effect on Leadwire with by 2-Wire System Connection Method >
・ If the temperature of the lead wire varies in 2-wire system connection method, Zero shift is generated by varied temperature on the lead wire.
・ Leadwire with 3-wire system connection method is slightly affected by varied temperature and temperature effect on the leadwire becomes extremely small.



| | | | |
|--|-------------------------|---|-----------------------------|
| KYOWA | | MADE IN JAPAN | |
| Model 型式 | KFGS-10-120-C1-11 | Lot No. Y3829M | Quantity 数量 10 |
| | | Batch No. 113A | |
| Gage Factor (23°C, 50%) ゲージ率 | 2.10 ± 1.0% | Temperature Compensation for 主な適合材料 | STEEL |
| Gage Length ゲージ長 | 10 mm | Adoptable Thermal Expansion 適合線膨張係数 | 11.7 × 10 ⁻⁶ /°C |
| Gage Resistance (23°C, 50%) ゲージ抵抗 | 119.8 Ω ± 0.2% | Applicable Adhesive 主な適用接着剤 | CC-33A, PC-600 |
| Transverse Sensitivity Ratio (23°C, 50%) 横感度比 | (0.1 ± 0.3)% | Temperature Coefficient of Gage Factor ゲージ率の温度係数 | Refer to Graph グラフ参照 |
| Thermal Output 熱出力 | Refer to Graph グラフ参照 | | 共和品-1437B |



See the back of package for installation of Kyowa strain gages.
共和ひずみゲージのお取扱いには裏面をご覧ください。



KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.
3-3-1 Chōlugō-ka, Chōlū-shi, Tokyo 182-8520, Japan
TEL: +81-42-489-7220 FAX: +81-42-488-1122
www.kyowa-ei.com

株式会社 共和電業
〒182-8520 東京都調布市調布ヶ丘3-3-1
TEL: 042-488-1111 FAX: 042-481-3258
www.kyowa-ei.com



紙
表紙、台紙
PP
ゲージ保護材、PET
接着用フィルム、PE

Method of Compensating Leadwire Extension for compensation

If the leadwire is extended, use the following equation for compensation.

<2-wire system>

$$K_o = \frac{R}{R + rL} \cdot K$$

<3-wire system>

$$K_o = \frac{R}{R + \frac{rL}{2}} \cdot K$$

K_o: The after compensation gage factor
 K: Gage factor written on the package
 R: Gage resistance (Ω)
 r: Reciprocating resistance of leadwire per 1m(Ω/m)
 L: Length of leadwire(m)

NOTES

- For the strain gage with pre-attached leadwire, the compensated gage factor is written on the package.
- For the strain gage with pre-attached leadwire (2-wire system), the total resistance including the leadwires is written on the package.
- For the strain gage with pre-attached leadwire (3-wire system), the resistance excluding the leadwires is written on the package.

Temperature Effect of Leadwire with 2-Wire System

For the 3-wire system, the bridge output is free from any temperature effect on the leadwire.

<Equation>

$$\epsilon_r = \frac{rL}{R_g + rL} \cdot \frac{\alpha}{K_s}$$

ε_r: Thermally-induced apparent strain (μm/m/°C)
 R_g: Gage resistance (Ω)
 r: Reciprocating resistance of leadwire per 1m(Ω/m)
 L: Length of leadwire(m)
 K_s: Preset gage factor of strain amplifier, usually 2.00
 α: Resistive temperature coefficient of copper wire (ΔR/R/°C)
 ... 3.9 × 10⁻³/°C

| Type of Leadwire | Total resistance value per 1m (r) |
|---|-----------------------------------|
| Polyester wire (PEW) φ0.14mm | 2.24 Ω/m |
| Parallel vinyl wire 0.08mm ² | 0.44 Ω/m |
| Parallel vinyl wire 0.11mm ² | 0.32 Ω/m |

Strain Gage Bonding Procedure (to metal)

| | | | |
|---------------------------------------|---|--------------------------------------|--|
| 1. Treat the sample surface. | Remove rust, paint etc, from the surface where the measurement is to be made. Then lightly polish the surface with a sandpaper of #320-#600, and wipe away with solvent such as acetone, etc. | 5. Checking the gage bonding state | Check bonding state of the strain gage. Check resistance value and insulation. Apply 50V DC on less voltage for the checking. |
| 2. Mark the gage attachment position. | To bond the strain gage at a proper place, draw a mark-off line to be an indication of the bonding portion. | 6. Connect lead wires | Bond the gage terminal near the strain gage, then solder the strain gage and the leadwire. Do not apply excessive force to gage leads. |
| 3. Cement the gage. | Use the adhesive written on the front of the package. | 7. Moisture-proof where necessary | Select an appropriate moistureproof coating material according to measuring conditions. |
| 4. Press and cure. | Bond the strain gage (by pressurizing, curing, and aging) according to the instruction manual attached to the adhesive. | 8. Wire and connect the instruments. | Connect the leadwire to the measuring instrument. Next, it is ready for measurement. |

NOTES ●For details of strain gage boning procedures, see the instruction manual of the adhesives applied. ●Omit the item 6) for the leadwire attached gage.
 ● After taking out the strain gages from the package, store them in a dry environment such as in desiccator when not in use.

リード線を延長した場合のゲージ率補正

リード線を延長する場合は下記の式で補正して下さい。

<2線式の場合>

$$K_o = \frac{R}{R + rL} \cdot K$$

<3線式の場合>

$$K_o = \frac{R}{R + \frac{rL}{2}} \cdot K$$

K_o: 補正後のゲージ率
 K: ゲージパッケージに記載されているゲージ率
 R: ゲージ抵抗(Ω)
 r: リード線1m当たりの往復の抵抗値(Ω/m)

2線式結線法でのリード線の温度影響

3線式結線法の場合は、リード線の温度影響は回路的にキャンセルされます。

<計算式>

$$\epsilon_r = \frac{rL}{R_g + rL} \cdot \frac{\alpha}{K_s}$$

ε_r: リード線の温度による見かけひずみ (μm/m/°C)
 R_g: ゲージ抵抗(Ω)
 r: リード線1m当たりの往復の抵抗値(Ω/m)
 L: リード線の長さ(m)
 K_s: ひずみ測定器の設定ゲージ率... 通常は2.00