



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO – CTC/UFSC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Ana Julia Zunta Carniel

**Avaliação da sensibilidade dos parâmetros de ultrassom difuso na caracterização de misturas de concreto**

Florianópolis  
2021

Ana Julia Zunta Carniel

**Avaliação da sensibilidade dos parâmetros de ultrassom difuso na caracterização de misturas de concreto**

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

2021

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

Carniel, Ana Julia Zunta

Avaliação da sensibilidade dos parâmetros de ultrassom difuso na caracterização de misturas de concreto / Ana Julia Zunta Carniel ; orientador, Roberto Caldas de Andrade Pinto, 2021.

189 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

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

Ana Julia Zunta Carniel

**Avaliação da sensibilidade dos parâmetros de ultrassom difuso na caracterização de misturas de concreto**

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

Prof.<sup>a</sup> Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira, PhD  
Universidade Estadual de Campinas

Prof.<sup>a</sup> Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.<sup>a</sup>  
Universidade Federal de Santa Catarina - PPGEC/UFSC

Prof.<sup>a</sup> Ângela do Valle, Dr.<sup>a</sup>  
Universidade Federal de Santa Catarina - ECV/UFSC

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.<sup>a</sup> Philippe Jean Paul Gleize, Dr.  
Coordenador do Programa

---

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD  
Orientador - PPGEC/UFSC

Florianópolis, 2021.



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus e Nossa Senhora, por serem os grandes responsáveis pela realização do meu sonho de obter o título de mestre!

Agradeço aos meus pais, Luiz Antônio e Meire, por me ensinarem desde pequena que o estudo e o conhecimento fazem a diferença em nossa vida. Por se dedicarem tanto a mim e ao meu irmão, Luiz Eduardo, e por darem todo o apoio necessário para que eu pudesse realizar esse sonho. Ao meu irmão, que também foi suporte aos meus pais no período em que estive longe de casa. Ainda, não posso deixar de ressaltar o agradecimento especial ao exemplo que minha mãe me deu desde pequena e por despertar em mim a vontade de ser professora, para fazer a diferença na vida de muitos alunos, assim como ela fez!

Ao meu namorado, Gabriel Teixeira, que foi meu suporte e ajuda em muitos momentos desafiadores e, junto à minha família, um grande incentivador para que eu realizasse esse sonho.

Ao meu orientador, professor Roberto Caldas de Andrade Pinto, pela orientação exemplar, com muita sabedoria, dedicação e paciência em todas as etapas do trabalho.

As professoras Ângela do Valle e Janaíde Cavalcante Rocha pela disponibilidade, atenção e contribuições valiosas dadas no exame de qualificação. Aos demais professores do PPGEC/UFSC que foram primordiais para minha formação acadêmica. Ao professor Marcelo Menezes Reis, por todo o auxílio necessário na realização das análises estatísticas do presente trabalho.

Aos amigos do GPEND/UFSC, em especial ao Matheus Agustini, que foi meu companheiro de dificuldades e conquistas em todas as fases do mestrado. A Hella Bressan, por me dar suporte desde antes da aprovação. Ao Isaque Tinoco e Pedro Martins por compartilharem os seus conhecimentos e auxiliarem em tudo o que foi necessário sobre o Método da Difusão Ultrassônica. À Priscila Warsch, Victória Dias, Kaio Oliveira e ao aluno de IC, Paulo Augusto da Rocha (Guto), por ajudarem e, junto com os demais citados, serem primordiais para a realização dos experimentos laboratoriais.

As demais amigas criadas pela convivência no PPGEC/UFSC. A Paula Beatriz Feliciano, que me acolheu e foi minha companheira durante todo o tempo que morei em Florianópolis/SC.

A minha agora sócia, Natália Casanova, por entender a minha dedicação ao mestrado.

Às empresas Supremo Secil Cimentos, em nome do Engenheiro Civil Edio Schmitt, Supermix Concreto e Grace Brasil, em nome de Denis Weidmann, pelo apoio através da doação dos materiais utilizados nas concretagens. Ecoplacas Compensados e Grupo GMAD pela doação dos materiais utilizadas na fabricação das formas dos corpos de prova.

Aos demais servidores e funcionários da UFSC, que, direta ou indiretamente, ajudarem no decorrer desta pesquisa, em especial ao professor Lourenço Panosso Perlin (LEE/GPEND), aos técnicos administrativos Luiz e Renato (LMCC), à Priscila Ferreira (Secretaria) e aos funcionários da carpintaria e vidraçaria.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos.

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

Para garantir a segurança de estruturas de concreto, com detecção de fissuras em estágios iniciais, tem-se a necessidade da realização do monitoramento e acompanhamento das estruturas ao longo de toda a vida útil. A aplicação do método do ultrassom difuso, na análise das ondas de chegada tardia em monitoramentos ultrassônicos no concreto, tem se mostrado um método eficiente na caracterização do concreto. No entanto, muitas são as incertezas atreladas às possíveis influências nos parâmetros difusos, uma vez que é um método recente e ainda pouco aplicado, quando comparado ao estudo da velocidade do pulso ultrassônico (VPU). Diante disso, o objetivo da presente pesquisa foi avaliar a sensibilidade dos parâmetros difusos na caracterização de misturas de concreto, verificando influências em relação ao método de ensaio (influências da geometria da amostra) e ao material. Para atingir os objetivos propostos, foram realizados ensaios de ultrassom com aplicação do método difuso em corpos de prova produzidos com concreto convencional, com formato de placas e prismas, em idades que variaram de 1 a 135 dias, nas posições pré-determinadas que abrangeram toda a dimensão do corpo de prova. As placas foram concretadas com dimensões de 100 x 100 x 10 cm e os prismas 10 x 10 x 40 cm. Após a obtenção das ondas ultrassônicas, foi realizado o processamento do sinal e obtenção dos parâmetros difusos: difusividade, dissipação e ATME, para cada idade e posição analisada. Ainda, simultaneamente à realização do monitoramento ultrassônico, foram realizados ensaios de resistência à compressão para correlacionar a evolução da resistência com os parâmetros difusos no tempo. Com os resultados dos parâmetros difusos e os dados obtidos experimentalmente, a partir de análises estatísticas, foi possível concluir que a distância do transdutor à borda do corpo de prova, a partir de 5 cm, não influenciou nos parâmetros difusos, em análises nas placas de concreto. No entanto, os parâmetros difusos sofreram influência do formato do corpo de prova e da solução analítica utilizada no processamento dos sinais ultrassônicos em corpos de prova prismáticos. Quanto às verificações relacionadas ao material, o único parâmetro considerado sensível ao avanço da idade do concreto foi a dissipação, o qual, ainda, apresentou boa correlação com a evolução da resistência à compressão no tempo. Por fim, foi possível concluir que a dimensão do agregado graúdo teve influência sobre os parâmetros difusos.

**Palavras-chave:** Ensaio de ultrassom. Método da difusão ultrassônica. Monitoramento ultrassônico. Influência da geometria da amostra. Influência do material.

## ABSTRACT

To ensure the safety of concrete structures, with crack detection in early stages, it is necessary to carry out monitoring and follow-up of the structures throughout their useful life. The application of the diffuse ultrasound method, in the analysis of late arrival waves in ultrasonic monitoring of concrete, has included an efficient method in the characterization of concrete. However, there are many uncertainties linked to the possible influences on the diffuse parameters, since it is a recent method and still little applied when compared to the study of the ultrasonic pulse velocity (UPV). Therefore, the objective of this research was to evaluate the sensitivity of the diffuse parameters in the characterization of concrete mixtures, verifying the influences in relation to the test method (influences of the sample geometry) and the material. To achieve the proposed objectives, ultrasound tests and application of the diffuse method were carried out on specimens obtained with conventional concrete, shaped like plates and prisms, at ages ranging from 1 to 135 days, in predetermined positions that covered the entire dimension of the specimen. The concrete plates measured 100 x 100 x 10 cm and the prisms 10 x 10 x 40 cm. After obtaining the ultrasonic waves, the signal processing and obtaining the diffuse parameters were performed: diffusivity, dissipation and ATME, for each age and analyzed position. Also, simultaneously with the ultrasonic monitoring, compressive strength tests were carried out to correlate the resistance evolution with the time-diffuse parameters. With the results of the fuzzy parameters and the data obtained experimentally, from statistical analyses, it was possible to conclude that the distance from the transducer to the edge of the specimen, larger than 5 cm, did not influence the fuzzy parameters, in analyzes on the concrete plates. However, the diffuse parameters were influenced by the shape of the specimen and the analytical solution used in the processing of ultrasonic signals in prismatic specimens. Regarding the verifications of the material, the single parameter considered sensitive to the advance of the concrete age was the dissipation, which also presented a good correlation with the evolution of the compressive strength over time. Finally, it was possible to conclude that the size of the coarse aggregate had an influence on the diffuse parameters.

**Keywords:** Ultrasound testing. Ultrasonic diffusion method. Ultrasonic monitoring. Influence of sample geometry. Influence of material.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de funcionamento do aparelho de ultrassom. ....	22
Figura 2 - Modo de transmissão dos transdutores: (A) direto, (B), semidireto e (C) indireto, sendo E o transdutor emissor e R o transdutor receptor. ....	23
Figura 3 - Ilustração da propagação de ondas ultrassônicas no concreto, mostrando o efeito de espalhamento múltiplo em ondas coerentes e incoerentes. ....	25
Figura 4 – Sinal de frequência central de 200 kHz transmitido no concreto.....	25
Figura 5 – Geração e propagação de ondas ultrassônicas nas proximidades dos cristais piezoelétricos do transdutor emissor em função do número de pontos de oscilantes (pontos em vermelho).....	27
Figura 6 – Propagação da onda ultrassônica em um meio (a) sem elementos dispersores, (b) com dispersores distribuídos e (c) com posicionamento diferente dos dispersores. ....	29
Figura 7 – (a) Princípio da reflexão; (b) refração de uma onda ultrassônica na superfície entre os meios. ....	31
Figura 8 – Modelo do endurecimento para ultrassom difuso em pasta de cimento fresca.....	32
Figura 9 - Principais etapas no desenvolvimento da velocidade de pulso em materiais cimentícios em idades iniciais. ....	33
Figura 10 - Orientação e posição dos eixos $x, y, z$ para soluções no domínio infinito (a) e finito (b). ....	39
Figura 11 – Sinal ultrassônico no domínio do tempo.....	42
Figura 12 – Espectrograma a) 2D – vista superior b) 3D. ....	43
Figura 13 - Representação da densidade espectral de energia em função do tempo (linha pontilhada) e aproximação por uma solução analítica (linha contínua). ....	44
Figura 14 - Influência da difusividade na densidade de energia. ....	45
Figura 15 - Influência da dissipação na densidade de energia. ....	46
Figura 16 - Resultado experimental e ajuste à solução analítica para frequência de excitação de (a) 100 kHz e (b) 300 kHz. ....	48
Figura 17 - Parâmetros de difusão em função da frequência de excitação em elementos de concreto: (a) difusividade e (b) dissipação ....	49
Figura 18 - 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).....	50

Figura 19 - Comparação da difusividade média entre amostrar (a) com agregados de 1 e 3 mm e (b) com agregados de 3 mm e sem agregados. ....	50
Figura 20 - Sinal medido da pasta de cimento com $a/c = 0,4$ e sua densidade espectral de energia : (a) 3 h; (b) 5 h após a mistura. ....	53
Figura 21 – Espectrogramas das análises de sinal para 0% de preenchimento com $\Delta t$ igual a a) 32 pontos e b) 64 pontos.....	54
Figura 22 – Comportamento dos parâmetros da difusão em função da distância entre os transdutores, sendo CC = com cone (transdutor receptor pontual) e SC = sem cone, para a) difusividade, b) dissipação, c) ATME e d) $P0$ . ....	56
Figura 23 – Etapas do programa experimental. ....	68
Figura 24 – Aparelho de ultrassom Pundit Lab.....	70
Figura 25 – Detalhamento do tronco de cone, com dimensões em milímetros: (a) perspectiva, (b) vista superior e (c) vista lateral. ....	71
Figura 26 – Tronco de cone posicionado no transdutor. ....	71
Figura 27 – Detalhes da forma das placas. ....	74
Figura 28 – Adensamento mecânico da placa de concreto.....	75
Figura 29 – Determinação das posições de leituras ultrassônicas e dimensões dos corpos de prova do lote PL, em cm.....	78
Figura 30 – Aparato utilizado para controle de pressão durante ensaio no corpo de prova do lote PL .....	79
Figura 31 – Execução do ensaio de ultrassom em um corpo de prova do lote PR.....	81
Figura 32 – Determinação das posições de leituras ultrassônicas e dimensões dos corpos de prova do lote PR, em cm. ....	82
Figura 33 – Espectro de potência correspondente a uma das ondas ultrassônicas do Lote PL-2 .....	83
Figura 34 - Aproximação da densidade de energia espectral experimental com a solução 2D infinita para uma das ondas ultrassônicas do Lote PL-2. ....	84
Figura 35 - Representação gráfica dos valores dos parâmetros difusos obtidos para o lote PL-1 aos 7 dias de idade, sendo (a) Difusividade ( $m^2/s$ ), (b) Dissipação ( $s^{-1}$ ) e (c) ATME (s). ....	96
Figura 36 – Resultados do parâmetro da difusividade na comparação das soluções analíticas 1D, 2D e 3D.....	109
Figura 37 - Resultados do parâmetros da dissipação na comparação das soluções analíticas 1D, 2D e 3D, para o lote PR-1. ....	111

Figura 38 - Resultados do parâmetros do ATME na comparação das soluções analíticas 1D, 2D e 3D, para o lote PR-1. ....	113
Figura 39 – Representação gráfica das ondas ultrassônicas obtidas ao longo do tempo para a Posição 3 do Lote PL-1. ....	118
Figura 40 - Representação gráfica das ondas ultrassônicas obtidas ao longo do tempo para a Posição 3 do Lote PL-2. ....	118
Figura 41 – Resultados do parâmetro de difusividade das posições 1, 2, 3 e 4 analisadas no Lote PL-1 nas idades de 1 a 28 dias.....	120
Figura 42 - Resultados do parâmetro de difusividade das posições 1, 2, 3 e 4 analisadas no Lote PL-2 nas idades de 1 a 135 dias.....	120
Figura 43 – Média dos resultados do parâmetro de difusividade obtidos para todas a posições analisadas em cada idade para o Lote PL-1 e Lote PL-2.....	121
Figura 44 - Resultados do parâmetro de dissipação das posições 1, 2, 3 e 4 analisadas no Lote PL-1 nas idades de 1 a 28 dias.....	123
Figura 45 - Resultados do parâmetro de dissipação das posições 1, 2, 3 e 4 analisadas no Lote PL-2 nas idades de 1 a 135 dias.....	123
Figura 46 - Média dos resultados do parâmetro de dissipação obtidos para todas a posições analisadas em cada idade para o Lote PL-1 e Lote PL-2.....	124
Figura 47 - Média dos resultados do parâmetro de ATME obtidos para todas a posições analisadas em cada idade para o Lote PL-1 e Lote PL-2.....	127
Figura 48 – Representação gráfica da curva de densidade de energia espectral analítica com base nos parâmetros médios obtidos para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias dos Lotes PL-1 e PL-2. ....	129
Figura 49 - Média dos resultados do parâmetro de difusividade obtidos para todas a posições analisadas em cada idade para o Lote PR-1. ....	130
Figura 50 - Média dos resultados do parâmetro de dissipação obtidos para todas a posições analisadas em cada idade para o Lote PR-1. ....	132
Figura 51 - Média dos resultados do parâmetro ATME obtidos para todas a posições analisadas em cada idade para o Lote PR-1.....	133
Figura 52 - Gráfico Dissipação x Resistência à Compressão dos resultados do Lote PL-1... 135	
Figura 53 - Gráfico Dissipação x Resistência à Compressão dos resultados do Lote PL-2... 136	
Figura 54 - Gráfico Dissipação x Resistência à Compressão dos resultados do Lote PR-1... 136	
Figura 55 - Resultados médios por tipo de brita para o parâmetro da difusividade, com a média das posições – Lotes PR. ....	138

Figura 56 - Resultados médios por tipo de brita para o parâmetro da dissipação, com a média das posições – Lotes PR. ....	138
Figura 57 - Resultados médios por tipo de brita para o parâmetro do ATME, com a média das posições – Lotes PR.....	139



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Impedância acústica de diferentes materiais constituintes do concreto.....	30
Tabela 2 – Tabela comparativa entre dimensões e soluções analíticas utilizadas em diferentes pesquisas.....	41
Tabela 3 – Quadro resumo dos traços utilizados, em kg/m <sup>3</sup> .....	72
Tabela 4 – Número de posições monitoradas nas respectivas idades de análise, no lote PL. ..	78
Tabela 5 – Dados parâmetros difusos na Posição 1 com um dia de idade, do lote PL-1. ....	86
Tabela 6 – Resultados obtidos para massa específica teórica, massa específica experimental e teor de ar incorporado.....	93
Tabela 7 – Resultados ensaio de resistência à compressão (MPa).....	94
Tabela 8 - Resultado ANOVA para o parâmetro da difusividade, na análise da distância da borda, Lote PL-1, idade de 7 dias.....	97
Tabela 9 - Resultado ANOVA para o parâmetro da difusividade, na análise da distância da borda, Lote PL-1, idade de 28 dias.....	97
Tabela 10 - Resultado ANOVA para o parâmetro da difusividade, na análise da distância da borda, Lote PL-2, idade de 7 dias.....	97
Tabela 11 - Resultado ANOVA para o parâmetro da difusividade, na análise da distância da borda, Lote PL-2, idade de 28 dias.....	97
Tabela 12 - Resultado ANOVA para o parâmetro da dissipação, na análise da distância da borda, Lote PL-1, idade de 7 dias.....	97
Tabela 13 - Resultado ANOVA para o parâmetro da dissipação, na análise da distância da borda, Lote PL-1, idade de 28 dias.....	98
Tabela 14 - Resultado ANOVA para o parâmetro da dissipação, na análise da distância da borda, Lote PL-2, idade de 7 dias.....	98
Tabela 15 - Resultado ANOVA para o parâmetro da dissipação, na análise da distância da borda, Lote PL-2, idade de 28 dias.....	98
Tabela 16 - Resultado ANOVA para o parâmetro ATME, na análise da distância da borda, Lote PL-1, idade de 7 dias. ....	98
Tabela 17 - Resultado ANOVA para o parâmetro ATME, na análise da distância da borda, Lote PL-1, idade de 28 dias. ....	98
Tabela 18 - Resultado ANOVA para o parâmetro ATME, na análise da distância da borda, Lote PL-2, idade de 7 dias. ....	99
Tabela 19 - Resultado ANOVA para o parâmetro ATME, na análise da distância da borda, Lote PL-2, idade de 28 dias. ....	99

Tabela 20 – Resultados da análise de influência da distância de borda nos parâmetros difusos dos Lotes PL-1 e PL-2, nas idades de 7 e 28 dias. ....	100
Tabela 21 – Comprimento médio da onda e correspondência da distância da borda com o comprimento da onda, para os lotes PL nas idades de 7 e 28 dias. ....	101
Tabela 22 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos parâmetros difusos, por idade para os lotes PL. ....	102
Tabela 23 – Resultados do parâmetro da difusividade por face, nas idades de 7 e 91 dias, para o lote PR-1. ....	104
Tabela 24 – Resultado ANOVA para o parâmetro da difusividade na análise da influência da face, idade de 7 dias, para o lote PR-1. ....	104
Tabela 25 - Resultado ANOVA para o parâmetro da difusividade na análise da influência da face, idade de 91 dias, para o lote PR-1. ....	104
Tabela 26 - Resultados do parâmetro da dissipação por face, nas idades de 7 e 91 dias, para o lote PR-1. ....	104
Tabela 27 - Resultado ANOVA para o parâmetro da dissipação na análise da influência da face, idade de 7 dias, para o lote PR-1. ....	105
Tabela 28 - Resultado ANOVA para o parâmetro da dissipação na análise da influência da face, idade de 91 dias, para o lote PR-1. ....	105
Tabela 29 - Resultados do parâmetro ATME por face, nas idades de 7 e 91 dias, para o lote PR-1. ....	105
Tabela 30 - Resultado ANOVA para o ATME na análise da influência da face, idade de 7 dias, para o lote PR-1. ....	105
Tabela 31 - Resultado ANOVA para o ATME na análise da influência da face, idade de 91 dias, para o lote PR-1. ....	106
Tabela 32 – Resultados de influência da geometria da amostra. ....	107
Tabela 33 – Resultado ANOVA para difusividade, na comparação de soluções analíticas, idade de 1 dia, para o lote PR-1. ....	109
Tabela 34 - Resultado ANOVA para difusividade, na comparação de soluções analíticas, idade de 7 dias, para o lote PR-1. ....	109
Tabela 35 - Resultado ANOVA para difusividade, na comparação de soluções analíticas, idade de 91 dias, para o lote PR-1. ....	110
Tabela 36 - Resultado Teste de <i>Tukey</i> para difusividade, em m <sup>2</sup> /s, na comparação de soluções analíticas, para o lote PR-1. ....	110

Tabela 37 - Resultado ANOVA para dissipação, na comparação de soluções analíticas, idade de 1 dia, para o lote PR-1. ....	111
Tabela 38 - Resultado ANOVA para dissipação, na comparação de soluções analíticas, idade de 7 dias, para o lote PR-1. ....	112
Tabela 39 - Resultado ANOVA para dissipação, na comparação de soluções analíticas, idade de 91 dias, para o lote PR-1. ....	112
Tabela 40 - Resultado Teste de <i>Tukey</i> para dissipação, em $ms - 1$ , na comparação de soluções analíticas, para o lote PR-1. ....	112
Tabela 41 - Resultado ANOVA para ATME, na comparação de soluções analíticas, idade de 1 dia, para o lote PR-1. ....	114
Tabela 42 - Resultado ANOVA para ATME, na comparação de soluções analíticas, idade de 7 dias, para o lote PR-1. ....	114
Tabela 43 - Resultado ANOVA para ATME, na comparação de soluções analíticas, idade de 91 dias, para o lote PR-1. ....	114
Tabela 44 - Resultado Teste de <i>Tukey</i> para ATME, em $s$ , na comparação de soluções analíticas, para o lote PR-1. ....	115
Tabela 45 – Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PL-1, para o parâmetro da difusividade com as médias das posições. ....	121
Tabela 46 – Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PL-2, para o parâmetro da difusividade com as médias das posições. ....	121
Tabela 47 – Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PL-1, para o parâmetro da dissipação com as médias das posições. ....	125
Tabela 48 – Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PL-2, para o parâmetro da dissipação com as médias das posições. ....	125
Tabela 49 – Média, desvio padrão, coeficiente de variação e comparação múltipla dos resultados obtidos para a dissipação do Lote PL-1, por idade, com a média das posições. ....	125
Tabela 50 - Média, desvio padrão, coeficiente de variação e comparação múltipla dos resultados obtidos para a dissipação do Lote PL-2, por idade, com a média das posições. ....	126
Tabela 51 – Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PL-1, para o parâmetro da ATME com as médias das posições. ....	127
Tabela 52 – Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PL-2, para o parâmetro da ATME com as médias das posições. ....	128
Tabela 53 - Média, desvio padrão, coeficiente de variação e comparação múltipla dos resultados obtidos para o ATME do Lote PL-2, por idade, com a média das posições. ....	128

Tabela 54 - Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PR-1, para o parâmetro da difusividade com as médias das posições.....	131
Tabela 55 - Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PR-1, para o parâmetro da dissipação com as médias das posições.....	132
Tabela 56 - Média, desvio padrão, coeficiente de variação e comparação múltipla dos resultados obtidos para a dissipação do Lote PR-1, por idade, com a média das posições.....	132
Tabela 57 - Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PR-1, para o parâmetro ATME com as médias das posições. ....	134
Tabela 58 - Média, desvio padrão, coeficiente de variação e comparação múltipla dos resultados obtidos para o ATME do Lote PR-1, por idade, com a média das posições. ....	134
Tabela 59 – Resultados de influência da dimensão do agregado graúdo. ....	140

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	MOTIVAÇÃO.....	17
1.2	OBJETIVOS.....	18
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
<b>2</b>	<b>ENSAIO DE ULTRASSOM .....</b>	<b>20</b>
2.1	ONDA ULTRASSÔNICA .....	20
2.2	DESCRIÇÃO DO MÉTODO.....	21
2.3	MODOS DE TRANSMISSÃO .....	23
2.4	PROPAGAÇÃO DE ONDAS NO CONCRETO.....	24
<b>2.4.1</b>	<b>Atenuação .....</b>	<b>26</b>
2.4.1.1	<i>Divergência Geométrica.....</i>	27
2.4.1.2	<i>Absorção.....</i>	27
2.4.1.3	<i>Dispersão.....</i>	28
<b>2.4.2</b>	<b>Impedância Acústica .....</b>	<b>29</b>
2.5	PROPAGAÇÃO DA ONDA ULTRASSÔNICA DURANTE PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	31
<b>3</b>	<b>DIFUSÃO DA ENERGIA DE ONDAS ULTRASSÔNICAS .....</b>	<b>35</b>
3.1	MÉTODO DA DIFUSÃO ULTRASSÔNICA.....	36
<b>3.1.1</b>	<b>Soluções Analíticas .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Processamento do Sinal Ultrassônico.....</b>	<b>42</b>
3.2	APLICAÇÕES DO MÉTODO DE ULTRASSOM DIFUSO EM ELEMENTOS DE CONCRETO .....	48
3.3	FATORES INFLUENCIADORES NOS PARÂMETROS DE DIFUSÃO.....	57
<b>3.3.1</b>	<b>Natureza do Material .....</b>	<b>57</b>
3.3.1.1	<i>Fissuração .....</i>	57

3.3.1.2	<i>Incorporação de Agregados</i> .....	57
3.3.1.3	<i>Hidratação do cimento e avanço da idade</i> .....	58
<b>3.3.2</b>	<b>Fatores externos ao material</b> .....	<b>59</b>
3.3.2.1	<i>Posicionamento dos Transdutores e Geometria da Amostra</i> .....	59
3.3.2.2	<i>Características dos transdutores</i> .....	61
3.3.2.3	<i>Pressão de acoplamento dos transdutores</i> .....	62
3.3.2.4	<i>Janela de Tempo e Banda de Frequência</i> .....	62
3.4	Considerações finais .....	63
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>65</b>
4.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	69
4.1.1	<b>Composição das misturas cimentícias</b> .....	<b>69</b>
4.1.2	<b>Equipamento de Ultrassom</b> .....	<b>69</b>
4.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	71
4.2.1	<b>Produção das misturas cimentícias</b> .....	<b>71</b>
4.2.2	<b>Moldagem dos corpos de prova</b> .....	<b>74</b>
4.2.3	<b>Ensaio de ultrassom</b> .....	<b>76</b>
4.3	PROCESSAMENTO DE SINAIS ULTRASSÔNICOS .....	82
4.4	PÓS-PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS PARÂMETROS DIFUSOS .....	85
4.4.1	<b>Análises relacionadas à geometria da amostra</b> .....	<b>89</b>
4.4.1.1	<i>Variabilidade das medições ultrassônicas na placa de concreto e verificação da influência da distância da borda</i> .....	89
4.4.1.2	<i>Influência da face nos prismas</i> .....	90
4.4.1.3	<i>Influência da geometria da amostra</i> .....	90
4.4.1.4	<i>Avaliação da diferença entre soluções analíticas</i> .....	90
4.4.2	<b>Análises relacionadas ao material</b> .....	<b>91</b>
4.4.2.1	<i>Evolução dos parâmetros difusos no tempo</i> .....	91
4.4.2.2	<i>Correlação dos parâmetros difusos com a resistência à compressão</i> .....	91
4.4.2.3	<i>Verificação da influência da dimensão do agregado graúdo</i> .....	92

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>93</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO.....	93
5.2	ANÁLISES RELACIONADAS À GEOMETRIA DA AMOSTRA.....	94
<b>5.2.1</b>	<b>Variabilidade das medições ultrassônicas na placa de concreto e verificação da influência da distância da borda .....</b>	<b>95</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Influência da face nos prismas.....</b>	<b>103</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Influência da geometria da amostra .....</b>	<b>106</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Avaliação da diferença entre soluções analíticas .....</b>	<b>108</b>
5.2.4.1	<i>Difusividade ultrassônica .....</i>	<i>108</i>
5.2.4.2	<i>Dissipação .....</i>	<i>111</i>
5.2.4.3	<i>ATME.....</i>	<i>113</i>
5.2.4.4	<i>Considerações finais sobre as soluções analíticas.....</i>	<i>115</i>
5.3	ANÁLISES RELACIONADAS AO MATERIAL .....	116
<b>5.3.1</b>	<b>Evolução dos parâmetros difusos no tempo .....</b>	<b>117</b>
5.3.1.1	<i>Placas de concreto – Lote PL.....</i>	<i>117</i>
5.3.1.2	<i>Prismas de concreto – Lote PR .....</i>	<i>130</i>
<b>5.3.2</b>	<b>Correlação dos parâmetros difusos com a resistência à compressão.....</b>	<b>135</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Verificação da influência da dimensão do agregado graúdo.....</b>	<b>137</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>142</b>
6.1	COM RELAÇÃO AO MÉTODO DE ENSAIO PARA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DIFUSOS EM UM CORPO DE PROVA.....	143
<b>6.1.1</b>	<b>Variabilidade das medições ultrassônicas na placa de concreto e verificação da influência da distância da borda .....</b>	<b>143</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Influência da geometria de corpos de prova .....</b>	<b>143</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Verificação da diferença entre soluções analíticas em corpos de prova prismáticos .....</b>	<b>144</b>
6.2	COM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DIFUSOS, CONSIDERANDO INFLUÊNCIAS DO MATERIAL.....	144
<b>6.2.1</b>	<b>Influência da idade do concreto, após o endurecimento .....</b>	<b>144</b>

<b>6.2.2</b>	<b>Comparação da evolução dos parâmetros difusos com a evolução da resistência à compressão de concretos .....</b>	<b>145</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Influência da dimensão do agregado graúdo .....</b>	<b>145</b>
<b>6.3</b>	<b>APLICAÇÕES PRÁTICAS .....</b>	<b>145</b>
<b>6.4</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>146</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>148</b>
	<b>APÊNDICE A – Ensaio preliminar: Determinação do número de acoplamentos e leituras .....</b>	<b>153</b>
	<b>APÊNDICE B – Ensaio de caracterização dos agregados utilizados.....</b>	<b>160</b>
	<b>APÊNDICE C – Aparato para controle de pressão .....</b>	<b>162</b>
	<b>APÊNDICE D – Resultados de aderência a normalidade e igualdade de variâncias ....</b>	<b>167</b>
	<b>APÊNDICE E – Gráficos de superfície dos parâmetros difusos obtidos no Lote PL para as idades de 7 e 28 dias .....</b>	<b>173</b>
	<b>ANEXO A – Caracterização cimento CP V ARI.....</b>	<b>176</b>
	<b>ANEXO B – Caracterização aditivo superplastificante .....</b>	<b>177</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Propriedades estruturais do concreto, como a resistência à compressão e, até mesmo, a vida útil das estruturas, são determinadas pelo desenvolvimento da microestrutura do concreto com o tempo. No entanto, as estruturas de concreto estão sujeitas a carregamentos e agentes externos que promovem fissuração interna e fissuras estruturais.

Para evitar problemas críticos e que muitas vezes podem levar uma estrutura ao colapso, tem-se uma perspectiva de monitoramento e acompanhamento das estruturas de concreto, tanto durante a fase de construção quanto no estado de serviço. Em estruturas monitoradas, fissuras identificadas em estágios iniciais podem receber tratamentos paliativos, garantindo a segurança e a vida útil da edificação, além de evitar maiores gastos para recuperação.

Para isso, é de suma importância a realização do monitoramento das estruturas ao longo de toda sua vida útil. A aplicação de ensaios não destrutivos, em específico o ensaio de ultrassom, tem sido considerado um método avançado para monitorar a evolução de materiais cimentícios com o tempo, devido à sua base física, precisão, facilidade de uso e natureza não destrutiva (TRTNIK; GAMS, 2013).

No ensaio de ultrassom, ondas mecânicas se propagam ao longo do material. No concreto, as ondas ultrassônicas são compostas por ondas coerentes de chegada direta em sua parte inicial, sendo a parte restante da onda considerada incoerente de chegada tardia e aleatória. Diversos autores comprovaram a eficiência e a sensibilidade do monitoramento ultrassônico no desenvolvimento das propriedades mecânicas e em processos de fissuração de estruturas do concreto através da análise da onda direta pela velocidade de pulso ultrassônico (VPU), ensaio difundido em pesquisas e inspeções estruturais (REINHARDT; GROBE; HERB, 2000; CHOTARD *et al.*, 2001; YE *et al.*, 2004; ZHANG *et al.*, 2013; KARAIKOS *et al.*, 2015; YOO, SHIN; YOON 2016; PIQUE; VASQUEZ; TOLEDO FILHO, 2017; BRESSAN, 2019).

No entanto, devido à natureza heterogênea do concreto (por ser constituído de pasta de cimento, agregados miúdos e graúdo, adições, vazios, entre outros) e a possível presença de falhas, as ondas ultrassônicas sofrem dispersões, resultando não apenas nas ondas de chegada direta avaliadas pela VPU, mas também em ondas de chegada tardia, chamadas ondas *codas*. As ondas *codas* promovem a formação de um campo difuso, no qual as ondas percorrem um caminho mais longo e mais sensível a pequenas mudanças no meio de propagação (como as

alterações na evolução do concreto com o tempo e/ou falhas) que as ondas diretas analisadas por VPU (DEROO et al., 2010; PLANÈS & LAROSE, 2013).

Para analisar as ondas *codas*, uma das técnicas existentes é o método do ultrassom difuso. De acordo com Quiviger *et al.* (2012), a difusão ultrassônica pode ser aplicada para fins de caracterização do concreto. A análise pela difusão da propagação complexa de múltiplas ondas dispersas no material indica características da microestrutura e das propriedades viscoelásticas do meio de propagação. No entanto, por ser considerada uma nova alternativa de análise da onda ultrassônica em concretos, o método ainda é pouco difundido no meio acadêmico, sem comprovações de aplicações práticas em estruturas reais.

O transporte difuso das ondas ultrassônicas tem relação expressiva com a condução de calor (SHENG, 2006). Assim, a densidade de energia (energia por frequência, por volume) de um campo ultrassônico difuso disperso pode ser aproximada pela equação de difusão (WEAVER; SACHSE, 1995; WEAVER, 1998), com procedimentos numéricos semelhantes às soluções da teoria da transferência de calor (PLANÈS; LAROSE, 2013). Dependendo das dimensões e da influência da geometria da amostra em que é analisada a propagação da onda, são utilizadas diferentes soluções analíticas, em domínios uni, bi e tridimensional. A partir da resolução das equações por técnicas numéricas, são obtidos os parâmetros difusos: difusividade, dissipação e ATME (tempo de chegada do pico de amplitude máxima da energia difusa, do inglês *Arrival Time of the Maximum Energy*). No método do ultrassom difuso, as discussões são norteadas pelos resultados dos parâmetros difusos, obtidos a partir das ondas ultrassônicas.

Considerando aplicações do método do ultrassom difuso na caracterização do concreto, estudos realizados por Yim, An e Kim (2016), por exemplo, comprovaram a relação da evolução dos parâmetros da difusão com a hidratação de pastas de cimento nas primeiras oito horas de idade. Ainda, Deroo *et al.* (2010) avaliaram danos de microfissuras no concreto causados por reação álcali-agregado e por efeitos térmicos. Ahn *et al.* (2019) analisaram os parâmetros da difusão na avaliação de danos por microfissuras ao concreto simuladas pela adição de fibras de polipropileno com características mecânicas mais baixas que o concreto. Assim, o uso dos parâmetros de difusão para complementar o estudo da VPU fornece uma nova abordagem para aplicações dos ensaios de ultrassom, como a detecção de pequenas alterações no concreto (JIANG *et al.*, 2019).

Recentemente, no Grupo de Pesquisa e Ensaio Não Destrutivos (GPEND) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no qual este trabalho está inserido, Bressan (2019) avaliou o desenvolvimento de parâmetros associados à propagação da onda de ultrassom

(velocidade de pulso, velocidade de grupo, amplitude máxima, energia total, pico de frequência e frequência central) no monitoramento das primeiras horas de idade do concreto como uma alternativa na identificação do período de pega. Além disso, Martins (2019) utilizou o método do ultrassom difuso na avaliação do preenchimento parcial e total com sistema epóxi em fendas induzidas na superfície de estruturas de concreto. O método do ultrassom difuso também foi aplicado por Tinoco (2019) que avaliou a perda de rigidez de vigas de concreto armado submetidas ao ensaio de flexão por meio do ensaio de ultrassom e da aplicação do método de aproximação da difusão da energia de ondas ultrassônicas.

Apesar da existência de pesquisas que comprovem a sensibilidade do monitoramento ultrassônico no concreto e nos danos a esse, muitas são as incertezas atreladas à análise pela difusão ultrassônica. A primeira problemática apresentada é em relação ao comportamento dos parâmetros difusos com a evolução da idade do concreto, após o endurecimento. Não foram encontrados estudos específicos na literatura científica sobre a temática.

Ainda, é incerta a influência da dimensão dos agregados graúdos nos parâmetros difusos, como cita Ahn et al. (2019). A pesquisa na qual é baseada a teoria difundida na literatura científica foi realizada por Becker, Jacobs e Qu (2003). Os autores utilizaram esferas de vidro com diâmetros de 1 e 3 mm, como representação dos agregados graúdos. No entanto, vidro e agregados usualmente utilizados na construção civil possuem impedância acústica diferentes, o que influencia diretamente na propagação da onda ultrassônica e, conseqüentemente, na análise da onda difusa.

Outros fatores que geram incertezas nas análises da difusão ultrassônica estão relacionados às características de ensaio e de geometria da amostra. Na literatura científica, características como distanciamento entre transdutores, posição dos transdutores em relação a borda da amostra, número de posições e tipo de arranjo de leitura são intrínsecas a cada autor. Ademais, pouco se sabe sobre o quanto uma posição de leitura representa do todo e quanto uma posição pode ser influenciada pela distância à borda do corpo de prova, considerando a atenuação total da onda. Essas incertezas dificultam o entendimento dos resultados obtidos em estruturas com manifestações patológicas, principalmente quando não há referência da estrutura sã, e impossibilita a aplicação prática no monitoramento de estruturas.

Considerando ainda possíveis influências externas ao material, a realização do monitoramento de estruturas reais com o método da difusão ultrassônica pode ser influenciada pela geometria do corpo de prova, face de realização da leitura, entre outros. Por fim, é válido ressaltar que os parâmetros difusos também podem sofrer influências relacionadas ao

processamento dos sinais, como por exemplo, em relação a escolha da solução analítica utilizada na análise.

Diante disso, percebe-se a necessidade de averiguar como as variáveis relacionadas ao material e à geometria das amostras influenciam nos parâmetros difusos. O conhecimento prévio do comportamento desses parâmetros em estruturas íntegras pode abrir caminhos para a detecção de fissuras formadas com o tempo através do método do ultrassom difuso. A percepção da formação dessas falhas é um dos fatores que visam garantir a durabilidade e vida útil das estruturas.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Com base nas referências bibliográficas estudadas, constatou-se que a análise do comportamento dos parâmetros obtidos pelo método do ultrassom difuso pode ser capaz de detectar pequenas alterações nos concretos no decorrer da evolução da idade, como uma forma alternativa e que pode se mostrar mais sensível que os métodos de análise da onda direta.

Como as principais propriedades de resistência e durabilidade de estruturas de concreto estão relacionadas à integridade do concreto, um monitoramento adequado visa, conjuntamente a outros fatores, garantir a segurança dessas estruturas. Além disso, se faz necessária a realização de estudos sobre monitoramentos aplicáveis a estruturas reais e que sejam capazes de detectar o surgimento de pequenas falhas. No entanto, para que isso seja possível, é necessário saber o comportamento dos parâmetros analisados no desenvolvimento de estruturas sãs, ou seja, sem danos.

O objetivo desta pesquisa visa dar continuidade aos estudos realizados no GPEND/UFSC e considera que a análise ultrassônica pelo método da difusão pode ser relevante para a garantia da durabilidade e da segurança das estruturas, a partir de aplicações práticas. Para isso, se faz necessário verificar possíveis variáveis relacionadas ao material ao longo do tempo e à geometria das amostras, para garantir a correta interpretação dos resultados dos parâmetros difusos obtidos em ensaios de campo. Ressalta-se que o método da difusão ultrassônica é um assunto atual e recente, em que não foram encontrados estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros difusos com o avanço da idade do concreto e sobre possíveis influências quanto à geometria da amostra, como influência da posição do transdutor em relação a borda, sensibilidade dos parâmetros difusos quanto ao formato do corpo de prova, entre outros.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a sensibilidade dos parâmetros de ultrassom difuso na caracterização de misturas de concreto.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

Com relação ao método de ensaio para obtenção dos parâmetros difusos em um corpo de prova:

- a) Verificar a influência da geometria de corpos de prova;
- b) Verificar a influência do posicionamento dos transdutores em relação à distância da borda;
- c) Verificar a diferença entre soluções analíticas em corpos de prova prismáticos;

Com relação aos parâmetros difusos, considerando influências do material:

- a) Verificar a influência da idade do concreto, após o endurecimento;
- b) Comparar a evolução destes parâmetros com a evolução da resistência à compressão de concretos;
- c) Avaliar a influência da dimensão do agregado graúdo.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em sete capítulos, sendo eles: Introdução, Ensaio de ultrassom, Difusão da energia de ondas ultrassônicas, Materiais e métodos, Resultados e Discussões e, por fim, Conclusão.

No primeiro capítulo é apresentada a introdução do trabalho, com as motivações para a realização do estudo, além dos objetivos geral e específicos.

A revisão bibliográfica do estudo é apresentada no segundo e terceiro capítulos. No segundo capítulo estão descritas as bases teóricas sobre o ensaio de ultrassom, em específico às de propagação de ondas ultrassônicas, introduzindo as particularidades referentes à propagação no concreto, considerando-o um meio heterogêneo. O terceiro capítulo refere-se ao Método da

Aproximação por Difusão da Energia de Ondas Ultrassônicas, com a apresentação da teoria que envolve o método, possíveis soluções analíticas, parâmetros obtidos e fatores que a influenciam, além de trabalhos de aplicação do método no concreto.

A partir da revisão bibliográfica apresentada, no quarto capítulo estão descritos os materiais e métodos da presente pesquisa, com a apresentação dos materiais utilizados no estudo e a descrição dos procedimentos experimentais realizados. Ainda, é delineada a forma de processamento dos sinais ultrassônico e análise dos resultados.

No quinto capítulo estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das misturas analisadas e após o processamento dos sinais ultrassônicos. Ainda, é apresentada a discussão dos resultados com base nas análises estatísticas e na literatura científica.

Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a pesquisa e as sugestões de trabalhos futuros. Em seguida, estão apresentadas as referências utilizadas no trabalho.

## 2 ENSAIO DE ULTRASSOM

O ensaio de ultrassom é caracterizado como um ensaio não destrutivo, de alta sensibilidade, baseado na propagação de ondas ultrassônicas. Está diretamente relacionado à avaliação de propriedades mecânicas do meio de propagação e auxilia na detecção de defeitos ou descontinuidades internas em variados tipos e formas de materiais, possibilitando a identificação de falhas e manifestações patológicas em estruturas de concreto (ANDREUCCI, 2018; PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

O ensaio de ultrassom tem se mostrado um método eficaz na avaliação da integridade do concreto há mais de 60 anos, especificamente pela análise da velocidade do pulso ultrassônico (VPU). Por ser um ensaio não destrutivo que permite várias medições no mesmo ponto, é possível monitorar as variações internas do concreto por um longo período de tempo, como as alterações na microestrutura ocasionadas pelo processo de hidratação e aparecimento de fissuras provenientes de retrações e esforços mecânicos.

Apesar da VPU ser confiável na inspeção do concreto, atualmente, as pesquisas com ênfase em ensaios ultrassônicos são destinadas a busca de novas metodologias de análise do formato de onda. A análise do ultrassom difuso é um método alternativo ao uso do ultrassom convencional, uma vez que o último avalia somente as mudanças na velocidade do pulso ultrassônico. Yim *et al.* (2016), Ahn *et al.* (2019), Tinoco (2019) e Martins (2019), por exemplo, mostraram a eficácia da análise da difusividade ultrassônica no monitoramento de estruturas de concreto.

Assim, estimuladas pela facilidade de manuseio e custo relativamente baixo do equipamento, pesquisas voltadas para uma nova abordagem das ondas ultrassônicas proporcionam a melhoria das aplicações desse ensaio.

### 2.1 ONDA ULTRASSÔNICA

As ondas ultrassônicas são classificadas como ondas mecânicas. Essa classificação é dada pelas vibrações mecânicas geradas pela onda no meio de propagação. Quando a onda é introduzida em um material, as partículas reagem à energia da onda sem o transporte de matéria. Ou seja, é a energia da onda que se move através do material (SINGH, 2016).

A quantidade de vibração gerada pela onda é representada pela frequência da onda, parâmetro que corresponde ao número de ciclos completados pela função da onda por

segundo, em Hertz (Hz). As ondas ultrassônicas são aquelas com frequência superior a 20 kHz, frequência a partir da qual a onda não é mais audível ao ser humano. Apesar das ondas ultrassônicas variarem até 50 MHz, para o monitoramento do concreto é preferível a utilização de ondas de baixa frequência, até 1 MHz. Frequências mais baixas acarretam em menor atenuação da energia durante o transporte da onda, o que garante melhor caracterização do material em aplicações de inspeções estruturais, por exemplo (PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

O transporte da onda em um meio ocorre com uma determinada velocidade de propagação, independente da frequência. Ao relacionar a velocidade ( $v$ ) à frequência ( $f$ ), obtém-se o comprimento de onda ( $\lambda$ ), como apresentado na Equação (1). O comprimento de onda representa a distância entre dois picos de ondas consecutivos.

$$v = \lambda \cdot f \tag{1}$$

Em corpos considerados elásticos, ou seja, corpos em que as ondas podem se propagar para todas as direções, a direção de propagação das ondas ultrassônicas pode ser representada por três configurações: longitudinal, transversal e superficial. Em uma onda longitudinal, também chamada de onda de compressão ou onda-P, as partículas vibram na mesma direção que o movimento de propagação. Nas ondas transversais, ondas de cisalhamento ou ondas-S, as partículas vibram na direção perpendicular ao movimento de propagação. Por fim, as ondas superficiais, ondas Rayleigh ou ondas-R são uma combinação das ondas longitudinais e transversais, se propagando em uma configuração elíptica ao longo da superfície do material (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004; SINGH, 2016; ANDREUCCI, 2018).

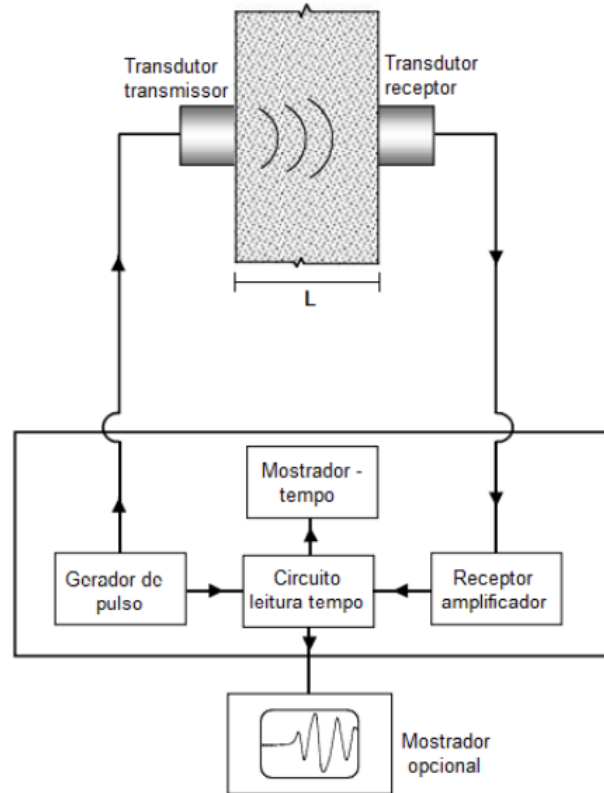
## 2.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

Baseado no princípio da propagação de um pulso ultrassônico em um meio de interesse, o ensaio de ultrassom consiste na geração de pulsos por um circuito eletrônico. Os pulsos são transformados em ondas mecânicas e transmitidas para o concreto pelo transdutor-emissor, sendo recebidas pelo transdutor-receptor, amplificadas e transformadas em pulsos elétricos novamente. Com isso, os circuitos eletrônicos realizam a leitura do tempo de propagação da onda e apresentam o pulso recebido em um formato de onda. A forma da onda apresentada é um gráfico da amplitude relativa do pulso de ondas em função do tempo de



propagação da onda (MEDEIROS, 2007; ASTM C 597-16, 2016; BRESSAN, 2019). Na Figura 1 está representado, de forma simplificada, o esquema de funcionamento do aparelho de ultrassom.

Figura 1 – Esquema de funcionamento do aparelho de ultrassom.



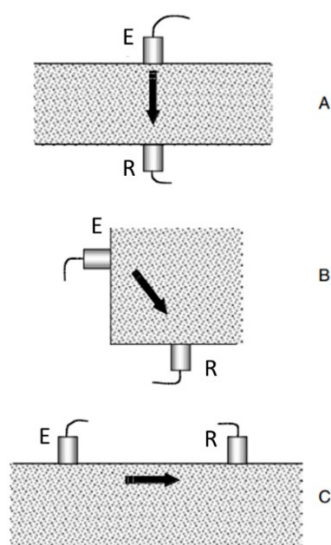
Fonte: Adaptado de Malhotra e Carino (2004).

A conversão do pulso ultrassônico em vibrações mecânicas (transdutor-emissor) e da energia mecânica recebida em energia elétrica (transdutor-receptor) advém dos materiais cristalinos de efeito piezoelétrico que constituem a base dos transdutores. A propagação das vibrações mecânicas pelo transdutor-emissor ocorre através de um meio acoplante à estrutura em estudo, como a vaselina (SILVA, 2017). Com isso, torna-se possível a detecção das ondas ultrassônicas recebidas pelo transdutor-receptor pelo circuito eletrônico do aparelho de ultrassom (SINGH, 2016; RESENDE, 2018).

## 2.3 MODOS DE TRANSMISSÃO

As leituras realizadas no ensaio de ultrassom podem assumir três configurações básicas de arranjo dos transdutores: direta, semidireta e indireta. Na Figura 2 estão apresentadas as três configurações.

Figura 2 - Modo de transmissão dos transdutores: (A) direto, (B), semidireto e (C) indireto, sendo E o transdutor emissor e R o transdutor receptor.



Fonte: Adaptado de Naik, Malhotra e Popovics (2004).

A NBR 8802 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônica (ABNT, 2019), define que na leitura direta os transdutores são posicionados em faces opostas do corpo de prova ou elemento de concreto. A norma esclarece também que na transmissão indireta os transdutores devem estar acoplados em apenas uma face do elemento, enquanto no arranjo de transmissão semidireta os transdutores estão posicionados em faces adjacentes, conforme observado na Figura 2.

Apesar de não haver determinação prévia da influência do modo de transmissão nas pesquisas em que o objeto de estudo é a difusão das ondas, Quiviger *et al.* (2012), In *et al.* (2016), Martins (2019) e Tinoco (2019) utilizaram o modo de transmissão indireto. Como comprovado nos estudos da velocidade de pulso realizados por Câmara (2006) e Amadio (2018), o arranjo indireto resulta em menor VPU quando comparado com o arranjo direto, consequência da maior dispersão do pulso por heterogeneidades presentes no concreto (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006). Assim, para análises por difusão ultrassônica,

quanto mais dispersas forem as ondas, maiores são as interações com o meio, o que possibilita melhor caracterização do meio de propagação (PLANÈS et al., 2014).

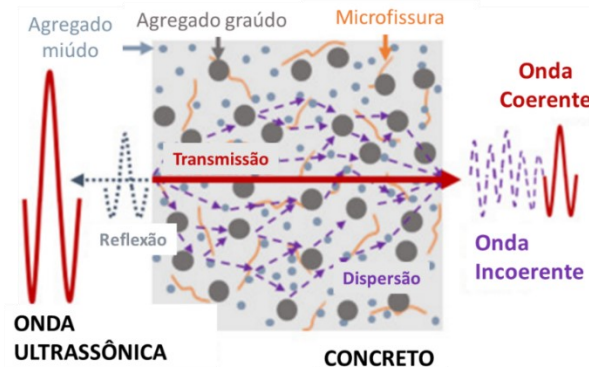
## 2.4 PROPAGAÇÃO DE ONDAS NO CONCRETO

O concreto, por ser um composto poroso de agregados embutidos na matriz de pasta de cimento, não pode ser considerado não dispersivo como os materiais homogêneos e isotrópicos (PHILIPPIDIS; AGGELIS, 2005). Dessa forma, na análise por ondas ultrassônicas, o concreto é considerado um material de natureza heterogênea devido à presença de pasta de cimento, agregados, poros e fissuras de diferentes tamanhos, formas e distribuições (AHN *et al.*, 2019).

Segundo Anugonda, Wiehn e Turner (2001) e Ramamoorthy, Kane e Turne (2004), a resposta de um corpo elástico heterogêneo (como o concreto) a uma onda ultrassônica varia em função do comprimento de onda e da escala de comprimento das discontinuidades. Quando o comprimento da onda analisada é da mesma escala de comprimento dos elementos dispersores, a onda transmitida pelo transdutor-emissor irá interagir com as heterogeneidades causando múltiplas reflexões. A onda inicial será dividida em diversos componentes, percorrendo caminhos distintos e alcançando o transdutor-receptor em momentos diferentes. Com isso, ocorre grande dispersão e, conseqüentemente, grande atenuação da onda ultrassônica (DERAEMAEKER; DUMOULIN, 2019).

Para um melhor entendimento do mecanismo de propagação da onda ultrassônica no concreto, considera-se a situação em que uma onda se propaga em um meio heterogêneo, encontrando elementos dispersores no caminho, como apresentado na Figura 3. Essas heterogeneidades ocasionam dispersões na energia da onda, alterando o caminho de propagação, porém mantendo a frequência da onda ultrassônica de origem. Assim, uma certa fração da energia das ondas se torna incoerente e uma porção finita permanece coerente. O encontro da onda com elementos dispersores sucessivos faz com que o componente coerente decaia exponencialmente com o número de dispersões (SHENG, 2006).

Figura 3 - Ilustração da propagação de ondas ultrassônicas no concreto, mostrando o efeito de espalhamento múltiplo em ondas coerentes e incoerentes.

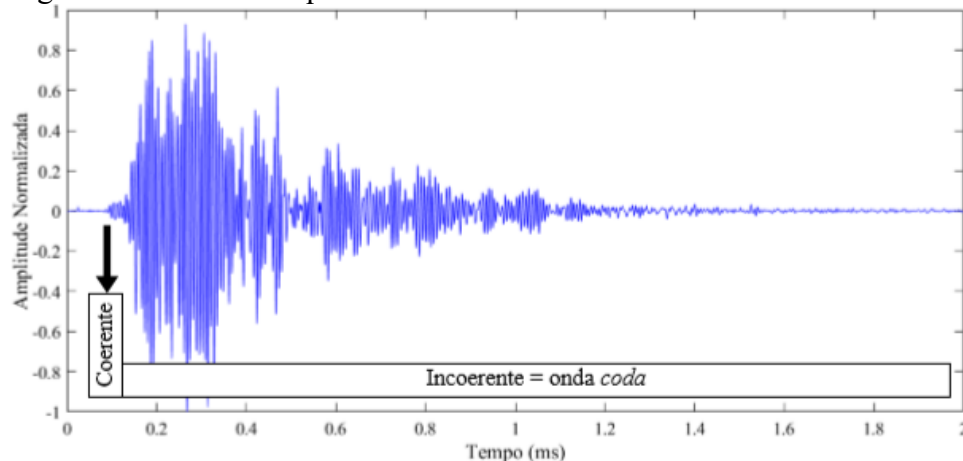


Fonte: Adaptado de Ahn *et al.* (2019).

Dessa forma, a resposta do material se torna uma combinação da energia coerente e da energia incoerente ou difusa. A energia coerente está relacionada a respostas provenientes da onda direta, como a diminuição da amplitude e a medição da velocidade. Em contrapartida, a energia difusa é proveniente da dispersão das ondas, que se propaga incoerentemente em um material heterogêneo (YIM *et al.*, 2016).

Na Figura 4 é possível observar o exemplo de um sinal de onda ultrassônica propagada no concreto. A primeira parte da figura corresponde à chegada da onda coerente (onda direta ou onda balística) e a segunda parte é o restante do sinal, resultante da difusão múltipla, chamada de onda incoerente ou onda *coda* (PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

Figura 4 – Sinal de frequência central de 200 kHz transmitido no concreto.



Fonte: Tinoco (2019).

As chamadas ondas *coda* correspondem a múltiplos caminhos dispersos. Uma vantagem considerável da onda *coda* é a sua alta sensibilidade a fracas perturbações do meio,

pois como as ondas dispersas passam mais tempo no material que as ondas diretas, elas acumulam a influência das pequenas heterogeneidades encontradas ao longo da sua propagação. Assim, uma heterogeneidade que não é detectada pela onda direta se torna evidente na análise da *coda* (PLANÈS; LAROSE, 2013).

Segundo Planès et al. (2014), a presença de heterogeneidades ocasiona distorções na fase e amplitude dos formatos da onda incoerente no decorrer do tempo de propagação. Essas variações aumentam com o tempo de propagação da onda no meio. Quanto mais dispersas forem as ondas, maior interação ocorrerá com o meio, ocasionando mudanças significativas nos formatos das ondas. Os autores ainda relatam que as variações nos formatos de onda dependem da posição da heterogeneidade em relação aos transdutores emissor e receptor. Quanto mais próximo o elemento dispersor estiver do emissor, maiores serão as variações nos formatos de onda.

Assim, para que as ondas ultrassônicas interajam fortemente com as heterogeneidades presentes no concreto e entrem em um regime de dispersão múltipla, a dimensão dos dispersores deve ser da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda. Ainda, a frequência dos transdutores utilizados deve ser entre 150 kHz e 1 MHz, de forma a obter a atenuação da onda coerente e o aparecimento de sinais de chegada tardia. Para frequências entre 20 a 150 kHz, o domínio é categorizado como espalhamento simples; entre 150 kHz e 1 MHz, como espalhamento múltiplo e, acima de 1 MHz, como regimes de absorção forte. Dessa forma, a atenuação aumenta com o aumento da frequência dos transdutores. Quanto maior a frequência, menor é o comprimento de onda e assim, a onda ultrassônica se torna mais sensível a pequenas heterogeneidades (PLANÈS; LAROSE, 2013).

Para melhor compreensão da propagação de ondas ultrassônicas no concreto, a seguir serão descritos alguns fenômenos influenciadores, como a atenuação e a impedância acústica.

#### **2.4.1 Atenuação**

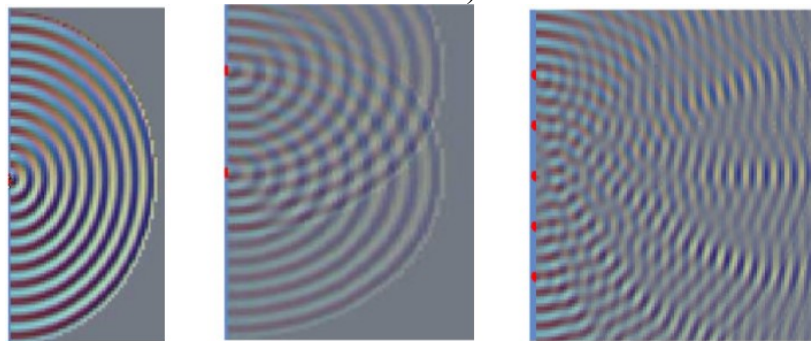
A atenuação da onda é definida pela redução na amplitude de uma onda ultrassônica entre dois picos sucessivos ao percorrer uma determinada distância em um material qualquer. A diferença de amplitudes dos sinais de pulso enviados e recebidos, embora não possa fornecer uma medida absoluta da transmissão do sinal, fornece uma indicação da atenuação do sinal no caminho percorrido (PHILIPPIDIS; AGGELIS, 2005). A atenuação é resultado da divergência

geométrica, absorção (ou dissipação) e dispersão (PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018; ANDREUCCI, 2018).

#### 2.4.1.1 Divergência Geométrica

A divergência geométrica está relacionada à perda de parte da intensidade ou energia da onda ultrassônica à medida que aumenta o afastamento da fonte emissora das vibrações acústicas. Para melhor entendimento do fenômeno da divergência geométrica, na Figura 5 é possível observar a interferência das ondas a partir da geração de infinitos pontos oscilantes pelos cristais do transdutor emissor (ANDREUCCI, 2018; PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

Figura 5 – Geração e propagação de ondas ultrassônicas nas proximidades dos cristais piezoelétricos do transdutor emissor em função do número de pontos de oscilantes (pontos em vermelho).



Fonte: Adaptado de Andreucci (2018).

#### 2.4.1.2 Absorção

A absorção é resultado da conversão da energia mecânica da onda ultrassônica em energia térmica devido ao fenômeno de atrito interno ligado à viscoelasticidade do meio de propagação e às interfaces entre os materiais, quando não são aderidos elasticamente entre si. Em outras palavras, é a energia cedida pela onda para que cada partícula oscile, transmitindo a vibração às outras partículas do próprio meio (JACOBS; OWINO, 2000; ANDREUCCI, 2018; PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018)

A energia perdida no fenômeno da absorção ocorre devido aos efeitos viscosos do material e corresponde a uma perda de informações da onda diretamente dependente da frequência, porém, a uma taxa menos expressiva quando comparada à dispersão. Ou seja, quanto maior a frequência, maior a absorção da onda pelo material (PLANÈS; LAROSE, 2013).

De maneira análoga, Punurai *et al.* (2007) citam que a absorção intrínseca de um material pode estar diretamente relacionada às suas características específicas, predominantemente nas perdas por atrito interno e dissipação viscoelástica. Especificamente no concreto, Philippidis e Aggelis (2005) e Ramaniraka *et al.* (2019) correlacionaram a absorção da onda com a zona interfacial pasta-agregado. Esta relação é justificada pelo atrito ocasionado pela porosidade da região nas interfaces dos materiais.

#### 2.4.1.3 Dispersão

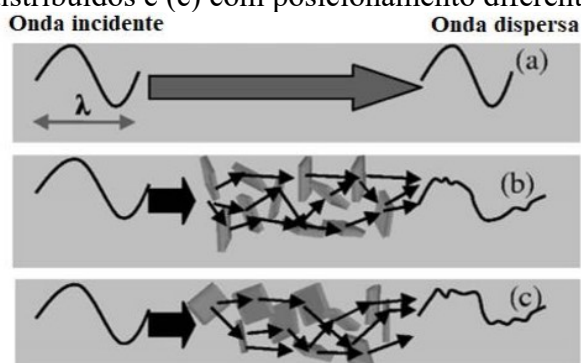
As perdas devido à dispersão das ondas são ocasionadas pelas heterogeneidades do material. Dependem da escala de comprimento intrínseco dos elementos dispersores, da quantidade desses elementos por unidade de volume, da distribuição e da impedância acústica desses em relação ao meio de propagação e, ainda, de efeitos geométricos (JABOCS; OWINO, 2000; PHILIPPIDIS; AGGELIS, 2005; PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018)

Quando o comprimento de onda é aproximadamente igual ou menor que o tamanho dos elementos dispersos, a onda coerente é interrompida, sendo dispersa por esses elementos (AHN *et al.*, 2019). Segundo Payan, Abraham e Garnier, (2018) a relação entre comprimento de onda e tamanho do agente dispersor que garante a máxima dispersão ocorre no domínio estocástico, com frequências entre 50 e 1000 kHz. Por exemplo, uma onda com frequência de 200 kHz, se propagando no concreto com velocidade de aproximadamente 4.000 m/s, possuirá um comprimento de onda de aproximadamente 20 mm, correspondente ao tamanho do agregado gráudo presente no concreto. Assim, o agregado gráudo corresponde a um elemento dispersor na matriz de concreto.

A dispersão da onda ocorre, pois, ao incidir em um elemento dispersor, a energia da onda ultrassônica é redirecionada para outras direções de propagação, por meio da reflexão, refração e transmissão da onda (SCHICKERT; KRAUSE, 2010). Ao contrário do fenômeno de absorção, no processo de dispersão a energia não é perdida, apenas é transformada em formatos de onda atrasados e aleatórios, quando comparada à onda direta (RAMAMOORTHY; KANE; TURNE, 2004).

Conforme pode ser observado na Figura 6, em um meio homogêneo, a energia da onda se propaga em linha reta entre o emissor e o receptor. No entanto, conforme aumentam os elementos dispersores, a energia da onda se distribui em vários caminhos com comprimentos diferentes, distorcendo a onda direta (AGGELIS; SHIOTANI, 2008).

Figura 6 – Propagação da onda ultrassônica em um meio (a) sem elementos dispersores, (b) com dispersores distribuídos e (c) com posicionamento diferente dos dispersores.



Fonte: Tinoco (2019) - Adaptado de Aggelis e Shiotani (2007).

Anugonda, Wiehn e Turner (2001) relacionam diretamente a dispersão da onda ultrassônica na microestrutura do concreto ao campo difuso ou incoerente da onda. Além disso, sugerem que métodos ultrassônicos difusos sejam estudados para avaliar danos em menor escala no concreto.

#### 2.4.2 Impedância Acústica

Conforme citado por Jabocs e Owino (2000) e Payan, Abraham e Garnier (2018), a dispersão da onda está relacionada à diferença da impedância acústica dos materiais que fazem parte do meio de propagação da onda ultrassônica.

A impedância acústica ( $Z$ ) de um material representa a resistência do material à passagem da energia das ondas ultrassônicas. O valor deste parâmetro, em  $\text{kg/m}^2\text{s}$ , é definido como o produto da densidade ( $\rho$ ) do meio, em  $\text{kg/m}^3$ , pela velocidade ( $V$ ) de propagação da onda nesse meio, em  $\text{m/s}$ , conforme a Equação (2) (SCHICKERT; KRAUSE, 2010); ANDREUCCI, 2018; PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

$$Z = \rho \cdot V \quad (2)$$

A Tabela 1 apresenta valores de impedância acústica para alguns materiais constituintes do concreto.



Tabela 1 – Impedância acústica de diferentes materiais constituintes do concreto.

<b>Material</b>	<b>Impedância acústica (kg/m<sup>2</sup>s)</b>
<b>Ar</b>	$0,4 \times 10^3$
<b>Água</b>	$1,5 \times 10^6$
<b>Concreto</b>	$7 a 11 \times 10^6$
<b>Agregado Granítico</b>	$17 \times 10^6$
<b>Aço</b>	$45 \times 10^6$

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

Quando a onda ultrassônica atinge um elemento com impedância acústica diferente do meio em que está sendo propagada, uma parte da energia da onda será transmitida e a outra parte refletida, ocorrendo uma transformação em sua fase (SCHICKERT; KRAUSE, 2010). A transmissão ou reflexão da onda depende do ângulo em que a onda incide no material. Caso a incidência não seja normal à superfície, a onda de compressão (longitudinal) é refletida e refratada como onda de compressão e de cisalhamento, seguindo a lei de Snell-Descartes, conforme apresentado na Figura 7 (PAYAN; ABRAHAM; GARNIER, 2018).

De acordo com a Lei de Snell-Descartes, a relação entre o seno do ângulo incidente ‘a’, apresentado na Figura 7, e o seno do ângulo refratado ‘d’ (onda longitudinal) ou ‘e’ (cisalhante) é constante e igual a relação entre as velocidades nos respectivos meios, conforme a Equação (3) (SINGH, 2016).

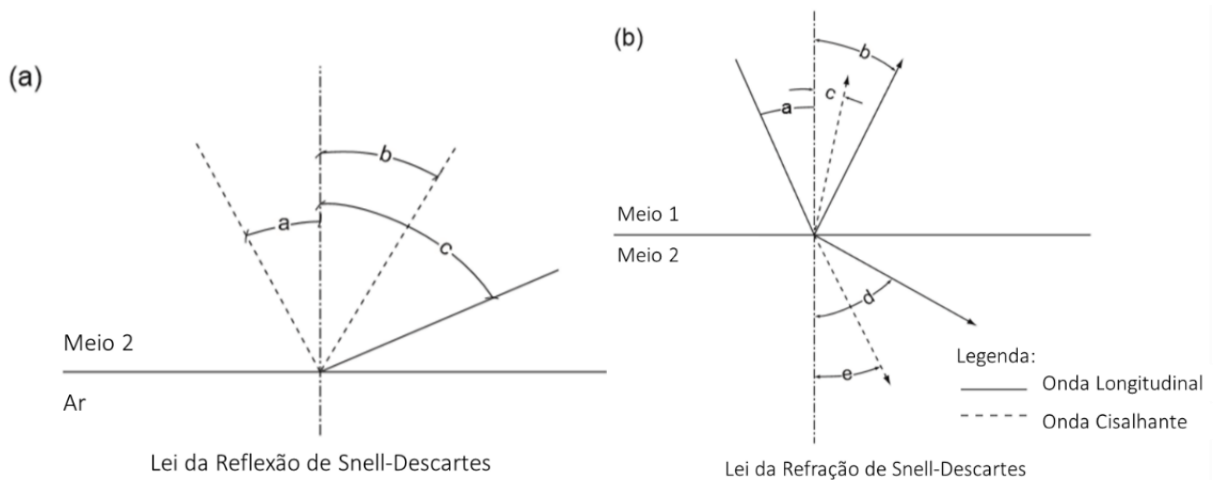
$$\frac{\text{sen } a}{\text{sen } d} = \frac{V_{\text{meio } 1}}{V_{\text{meio } 2}} \quad (3)$$

Quando o ângulo de incidência da onda é normal a superfície, a amplitude da onda refletida é considerada máxima. Nesses casos os coeficientes de reflexão R e de transmissão T são expressos, respectivamente, pelas Equações (4) e (5) (BALAYSSAC; GARNIER, 2017).

$$R = \frac{Z_{\text{meio } 2} - Z_{\text{meio } 1}}{Z_{\text{meio } 2} + Z_{\text{meio } 1}} \quad (4)$$

$$T = \frac{2 Z_{\text{meio } 2}}{Z_{\text{meio } 2} + Z_{\text{meio } 1}} \quad (5)$$

Figura 7 – (a) Princípio da reflexão; (b) refração de uma onda ultrassônica na superfície entre os meios.



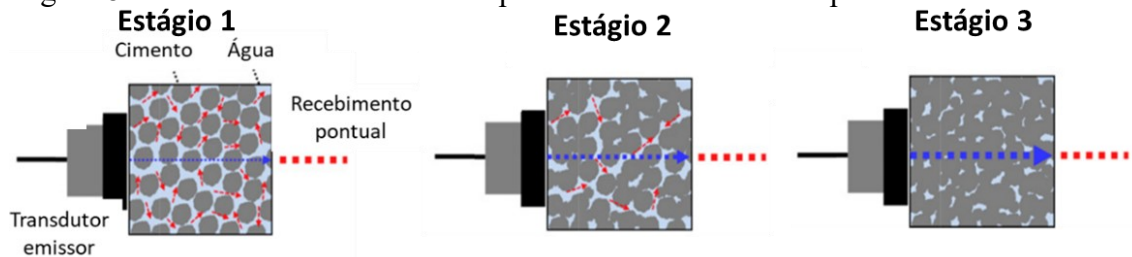
Fonte: Adaptado de Singh (2016).

Nos concretos, a diferença de impedância acústica entre os agregados e pasta de cimento influenciam diretamente na propagação da onda ultrassônica, conforme citado por Philippidis e Aggelis (2005) e Ramaniraka *et al.* (2019). Outra influência constatada pelos autores Yim, An e Kim (2016) foi em relação à diferença de impedância entre a fase sólida e a água durante o processo de hidratação do cimento, visto que a grande discrepância entre as impedâncias faz com que ocorra maior reflexão e refração da ondas ultrassônicas, quanto mais fresco estiver o concreto.

## 2.5 PROPAGAÇÃO DA ONDA ULTRASSÔNICA DURANTE PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

Diversos autores como Ye *et al.* (2004), Karaiskos *et al.* (2015), Yim, An e Kim (2016) e Yoo, Shin e Yoon (2016) descreveram o comportamento de propagação da onda ultrassônica com o desenvolvimento da hidratação do cimento. Os parâmetros ultrassônicos avaliados nas respectivas pesquisas foram relacionados aos três estágios da evolução do endurecimento de pastas de cimento, apresentados na Figura 8.

Figura 8 – Modelo do endurecimento para ultrassom difuso em pasta de cimento fresca.



Fonte: Adaptado de Yim, An e Kim (2016).

O Estágio 1 representa o estado inicial de uma pasta de cimento recém misturada, considerada como uma suspensão altamente concentrada em que as partículas de cimento na fase aquosa são dispersas e isoladas umas das outras. Nesse estágio o espaçamento das partículas sólidas é grande o suficiente para desenvolver a percolação da água no meio, ou seja, o meio de propagação da onda ultrassônica é uma fase viscosa semelhante à água. Devido à diferença da impedância entre a água e as partículas sólidas, as ondas dispersas se propagam por caminhos evidentemente distorcidos.

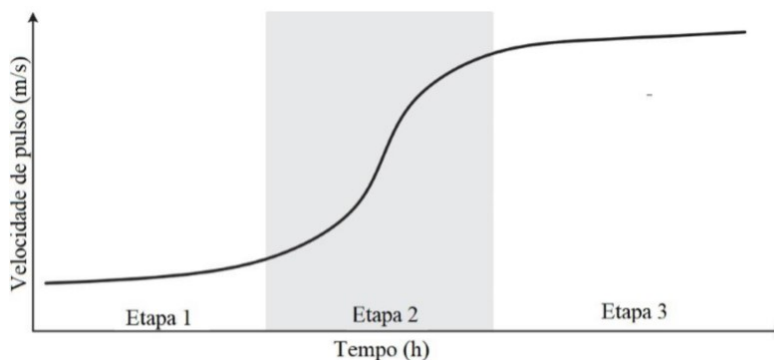
O Estágio 2 se inicia após o período de dormência, sendo observada a coagulação e a hidratação inicial do cimento com a formação de etringita, e, assim, o início do desenvolvimento de uma estrutura sólida, com partículas espaçadas irregularmente. Com isso, o resultado do fechamento dos caminhos distorcidos pelas partículas hidratadas é a propagação das ondas por um caminho mais curto.

No Estágio 3, a fase sólida se torna dominante no meio, uma vez que as partículas de cimento hidratadas estão quase totalmente conectadas, verificando-se a propagação da onda pelo caminho sólido e conseqüentemente uma onda com caráter menos dispersivo. Esse estágio está relacionado ao endurecimento da pasta de cimento e ao início da resistência mecânica. A partir desse estágio a pasta de cimento não impacta em grandes proporções na dispersão. As diferenças no caminhar da onda ultrassônica passam a ser resultados, principalmente, das heterogeneidades presentes na estrutura. No entanto, não há pesquisas na literatura científica atual que identifiquem possíveis influências de alterações no concreto após o endurecimento e início do Estágio 3 nos ensaios ultrassônicos, bem como da real influência das heterogeneidades em estruturas sãs.

Além da dispersão das ondas devido à formação de partículas sólidas pelo processo de hidratação do cimento que interferem nas ondas *coda*, vários autores têm estudado a influência na propagação da onda coerente, através da análise da velocidade de pulso ultrassônico (REINHARDT; GROBE; HERB, 2000; CHOTARD *et al.*, 2001; YE *et al.*, 2004; ZHANG *et*

*al.*, 2013; KARAIKOS *et al.*, 2015; YOO, SHIN; YOON 2016; PIQUE; VASQUEZ; TOLEDO FILHO, 2017; BRESSAN, 2019). Na Figura 9 está apresentada a visão esquemática da evolução típica da VPU nos três estágios citados anteriormente e em seguida estão as considerações feitas pelos autores citados, de maneira abrangente.

Figura 9 - Principais etapas no desenvolvimento da velocidade de pulso em materiais cimentícios em idades iniciais.



Fonte: Adaptado de Karaiskos *et al.* (2015).

Na Etapa 1 a VPU é muito baixa e constante, resultado da propagação da onda ultrassônica em um meio aquoso com partículas sólidas uniformemente distribuídas. Dessa forma, nesse primeiro estágio o sinal é difícil de ser medido, pois tende a ser dominado por ruídos, além dos valores de VPU estarem muito próximos ao da água. Na Etapa 2 observa-se um aumento acentuado da VPU correspondente ao rápido desenvolvimento de produtos de hidratação e a transformação da fase líquida para sólida. Por fim, na Etapa 3, o aumento da VPU é mais lento, uma vez que a taxa de crescimento dos produtos de hidratação diminui.

De forma a complementar os resultados de VPU encontrados na literatura científica, Bressan (2019), na análise da evolução da hidratação por ensaio de ultrassom, verificou que, além da velocidade de pulso, parâmetros como amplitude máxima, velocidade de grupo, energia total, pico de frequência e frequência central apresentaram desenvolvimentos crescentes ao decorrer do tempo de monitoramento nas primeiras idades. A autora ainda relata que os resultados referentes aos tempos necessários para atingir os percentuais de 25, 50, 75 e 90% de energia total transmitida tiveram um desenvolvimento decrescente.

Considerando as características de propagação da onda ultrassônica e os estudos apresentados, constata-se que é possível acompanhar o endurecimento do concreto através de diferentes parâmetros e análises ultrassônicas. Porém, percebe-se a falta de estudos que verifiquem a sensibilidade de parâmetros ultrassônicos com o avanço da idade após o endurecimento do concreto.

Segundo Aïtcin e Flatt (2015) a hidratação do cimento Portland encerra somente quando todas as partículas de cimento forem hidratadas ou quando a água não puder chegar à fase anidra das partículas de cimento. Dessa forma, a hidratação das partículas de cimento continua a ocorrer mesmo após o concreto ser considerado um material sólido e com elevada resistência, ocasionando pequenas alterações na microestrutura durante toda a evolução do tempo devido à pequena taxa de hidratação dos compostos anidros.

Diante disso, percebe-se a importância de estudos que visam identificar as alterações ocasionadas pelo avanço da idade do concreto à longo prazo na utilização de ensaios ultrassônicos. Entender o comportamento das ondas ultrassônicas no concreto considerando suas variações ao longo do tempo é primordial para a melhoria da qualidade das inspeções estruturais utilizando ultrassom. Com o conhecimento das influências do próprio material em estruturas sãs no decorrer do tempo é possível realizar a identificação de manifestações patológicas e caracterização da integridade estrutural de elementos de concreto em uso.

### 3 DIFUSÃO DA ENERGIA DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

A onda ultrassônica em materiais heterogêneos é composta pela parte coerente, que se desenvolve de forma direta através do caminho mais rápido entre os transdutores ultrassônicos, e pela parte incoerente (ou *coda*), considerada de chegada tardia. Durante a propagação da onda no concreto, um dos fenômenos influenciadores é a atenuação, resultado das perdas devido à dispersão da onda na microestrutura e à dissipação da onda pelas propriedades viscoelásticas da matriz água/cimento. As perdas ocorridas durante a propagação da onda no concreto resultam em um processo que se aproxima da difusão, com a formação de um campo difuso e incoerente (WEAVER, 1998; ANUGONDA; WIEHN; TURNER, 2001).

Estudos difundidos no meio acadêmico, como a VPU, analisam apenas a onda de chegada direta. No entanto, conforme citam Ramamoorthy, Kane e Turner (2004), a VPU depende do caminho de onda assumido e de uma interação entre o pulso e a heterogeneidade nesse caminho. Elementos dispersores posicionados distantes do caminho da onda direta não são verificados pela VPU, o que a torna relativamente insensível a caracterização do concreto como material. Com isso, percebe-se a necessidade de estudar e avaliar as ondas resultantes da formação do campo difuso.

O método da difusão ultrassônica permite a avaliação da onda incoerente, onde são computadas características que têm significado físico, como difusividade e dissipação. Dado que a onda incoerente corresponde a múltiplos caminhos dispersos, o método da difusão é dependente das heterogeneidades do concreto (agregados, fissuras, poros) que são distribuídas de forma aleatória. Quando o comprimento da onda analisada é da mesma escala de comprimento dos elementos dispersantes, ocorrem múltiplas reflexões da onda. Dessa forma, a difusão da onda ultrassônica é intrínseca às características do material, bem como das configurações utilizadas no ensaio ultrassônico: frequência dos transdutores (relacionada aos comprimentos de onda), espaçamentos dos transdutores (trajetória de propagação), entre outros (AHN *et al.*, 2019).

Como as ondas ultrassônicas sofrem dispersões durante todo o caminho de propagação no concreto, tem-se que o resultado do transporte de energia é difusivo. O fato de ser difusivo tem uma relação expressiva com a condução de calor, uma vez que em sólidos eletricamente isolantes o calor é transportado por ondas elásticas aleatoriamente dispersas. Como a condução de calor em sólidos é governada pela equação de difusão, conclui-se que as ondas ultrassônicas

(ou a energia das ondas ultrassônicas) aleatoriamente dispersas se propagam de maneira difusa (SHENG, 2006).

Assim, a densidade de energia (energia por frequência, por volume) de um campo ultrassônico difuso disperso deve evoluir, em tempos suficientemente tardios após muitas dispersões, de acordo com a equação de difusão (WEAVER, 1998). Porém, conforme mostrado por Martins (2019), a equação de difusão é apenas uma aproximação do comportamento do campo de uma onda elástica fortemente disperso.

Segundo Quiviger *et al.* (2012), o método do ultrassom difuso é aplicado para fins de caracterização do concreto. A análise pela difusão da propagação complexa de múltiplas ondas dispersas no material está relacionada às características da microestrutura (difusividade) e às propriedades viscoelásticas (dissipação) do meio de propagação.

A evolução da energia difusa ocorre em uma escala de tempo muito maior que o tempo necessário para a onda coerente se propagar no meio analisado. Na análise de ondas coerentes, como na velocidade de pulso da onda, a sensibilidade à microestrutura do concreto é menor, pois depende do caminho da onda assumida e de uma interação entre a onda e a heterogeneidade presente nesse caminho específico. Assim, o método da difusão ultrassônica resulta em informações mais completas sobre meio de propagação quando comparada à análise da energia coerente (RAMAMOORTHY; KANE; TURNE, 2004).

### 3.1 MÉTODO DA DIFUSÃO ULTRASSÔNICA

A difusão da onda ultrassônica em um material heterogêneo é descrita por uma Equação Diferencial Parcial (EDP) Parabólica de Segunda Ordem, que descreve a evolução temporal da densidade de energia espectral, sendo expressa na Equação (6) (WEAVER; SACHSE, 1995; WEAVER, 1998).

$$\frac{\partial \langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle}{\partial t} - D \nabla^2 \langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle + \sigma \langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle = P(\mathbf{r}, t, f), \forall \mathbf{r} \in \beta \quad (6)$$

Onde:

$E(\mathbf{r}, t, f)$  é a densidade de energia espectral analítica por unidade de volume (em um tempo  $t$  e uma frequência constante  $f$ ) em um ponto especificado no domínio espacial  $\beta$  pelo vetor posição  $\mathbf{r}$  de componentes em  $x$ ,  $y$  e  $z$ ;  $P(\mathbf{r}, t, f)$  é a densidade espectral de energia da fonte;  $D$  é a difusividade (dependente da frequência) e  $\sigma$  é a dissipação (dependente da frequência).

Ainda, o operador  $\langle . \rangle$  representa o “valor esperado” em relação a diferentes configurações possíveis e  $\nabla^2$  é o operador de Laplace, definido pela expressão apresentada na Equação (7).

$$\begin{aligned}\nabla^2 \langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle &= \nabla^2 \langle E(x, y, z, t, f) \rangle \\ &= \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \langle E(x, y, z, t, f) \rangle, \forall \mathbf{r} \in \beta\end{aligned}\quad (7)$$

De acordo com Punurai *et al.* (2007), para a aplicação da equação da difusão da onda ultrassônica, presume-se que o corpo seja isotrópico, ou seja, que o coeficiente de difusão seja independente da direção e que toda dispersão seja assumida como linearmente elástica, sem perda de energia durante a dispersão. Além disso, assume-se que as dimensões laterais do caminho de propagação de ondas são infinitas (YIM; AN; KIM, 2016).

A difusividade ultrassônica ou coeficiente de difusão,  $D$  (m<sup>2</sup>/s), representa a taxa de difusão ultrassônica (QUIVIGER *et al.*, 2012; YIM; AN; KIM, 2016). Um coeficiente de difusão menor, implica em um transporte de energia de onda ultrassônica mais lento do transdutor emissor para o transdutor receptor. Assim, uma menor difusividade ultrassônica representa o aumento da dispersão devido às heterogeneidades que retardam a difusão (DEROO *et al.*, 2010; AHN *et al.*, 2019).

O parâmetro da dissipação,  $\sigma$  (s<sup>-1</sup>), está relacionado ao atrito interno que ocasiona a perda de energia da onda ultrassônica. Este parâmetro caracteriza as propriedades viscoelásticas do material intrínsecas a matriz da pasta de cimento, sendo sensível a variações no tipo de cimento, relação água/cimento, tempo de cura, entre outros (ANUGONDA; WIEHN, TURNER, 2001; PUNURAI *et al.*, 2007; YIM; AN; KIM, 2016). Em síntese, a difusividade descreve os processos de dispersão da onda ultrassônica e a taxa de dissipação descreve a absorção da onda.

### 3.1.1 Soluções Analíticas

Conforme citado por Punurai *et al.* (2007), a equação da difusão apresentada na Equação (6) é semelhante à equação de transferência de calor, com a adição do termo referente à dissipação. Dessa forma, os procedimentos para determinação das soluções específicas são semelhantes às soluções da teoria da transferência de calor. O resultado obtido é a probabilidade de um campo de onda estar presente em uma dada posição, após um dado tempo de propagação (PLANÈS; LAROSE, 2013).



Para que a resposta da Equação (6), em um domínio  $\beta$  geometricamente simples, seja uma solução analítica, é necessário definir algumas condições de contorno baseando-se nos trabalhos de Seher *et al.* (2013) e In *et al.* (2013). Assim, primeiramente define-se a condição de contorno inicial, de forma que a densidade de energia espectral ultrassônica no domínio  $\beta$  seja nula no momento inicial,  $t = 0$ , conforme apresentado na Equação (8).

$$\langle E(\mathbf{r}, 0, f) \rangle = \langle E(x, y, z, 0, f) \rangle, \forall \mathbf{r} \in \beta \quad (8)$$

A segunda condição de contorno, assim como a condição de isolamento térmico na transferência de calor, considera a ausência da transmissão de energia ultrassônica da superfície da amostra de concreto para o ar que a envolve. Definida como Condição de Neumann, supõem-se que o gradiente na superfície  $\partial\beta$  do corpo  $\beta$  seja igual a zero (RAMAMOORTHY; KANE; TURNER, 2004). Isso significa que o fluxo de energia ultrassônica nas superfícies que limitam o domínio seja nulo, devido às diferenças de impedância, não haverá transmissão ao ar. A Equação (9) descreve matematicamente essa condição de contorno.

$$\begin{aligned} \nabla \langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle &= \nabla \langle E(x, y, z, t, f) \rangle = \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \langle E(x, y, z, t, f) \rangle \\ &= 0, \forall \mathbf{r} \in \partial\beta \end{aligned} \quad (9)$$

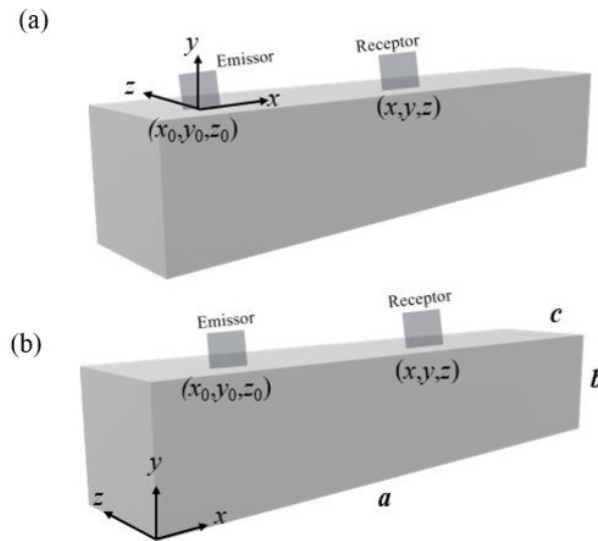
A última condição de contorno, chamada de condição de forçamento, considera uma excitação externa  $P(x, y, x, t)$ , que representam um impulso espacial e temporal na coordenada de origem, ou seja, na posição  $(x_0, y_0, z_0)$  e tempo  $t_0 = 0$ , com uma amplitude  $P_0$ , descrita na Equação (10).

$$\begin{aligned} P(x, y, z, t) &= P_0 \delta(t) \delta^3(\mathbf{r}) \\ &= P_0 \delta(t - t_0) \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0) \end{aligned} \quad (10)$$

Onde a amplitude  $P_0$  ( $V^2/Hz$ ) é um fator relacionado a energia de entrada, acoplamento do transdutor, entre outros aspectos relacionados a medição e  $\delta(x)$  representa a função Delta de Dirac.

Dependendo das dimensões e da influência da geometria da amostra em que é analisada a propagação da onda, são apresentadas diferentes soluções para a EDP. Respeitando as condições de contorno expostas, as soluções são divididas em domínio finito e infinito. Assim, na Figura 10 estão apresentadas as orientações e posição dos eixos  $x, y, z$  para ambos os domínios.

Figura 10 - Orientação e posição dos eixos  $x, y, z$  para soluções no domínio infinito (a) e finito (b).



Fonte: Martins (2019).

Considerando amostras de concreto em que as dimensões da seção são pequenas em relação ao comprimento, o problema é tratado como unidimensional (1D), sendo função somente da coordenada axial  $x$  e do tempo  $t$ . Esse é o caso apresentado por Anugonda, Wiehn e Turner (2001) e Yim, An e Kim (2016), que abordaram o problema pela solução analítica descrita na Equação (11), onde o escalar  $x$  é a distância entre o transdutor emissor e o receptor.

$$\langle E(x, t) \rangle = \frac{P_0}{2\sqrt{D\pi T}} e^{-x^2/(4Dt)} e^{-\sigma t} \quad (11)$$

Quando a espessura do corpo de prova analisado é pequena em relação as dimensões laterais ( $x, y$ ), o gradiente na direção  $z$  é desconsiderado. Dessa forma, o problema é tratado como uma placa, em domínio bidimensional (2D). Considerando que as dimensões  $x$  e  $y$  são infinitas, conforme apresentado por Becker, Jacobs e Qu (2003), Punurai *et al.* (2007) e

Quiviger *et al.* (2012), a solução analítica é a apresentada na Equação (12), onde  $x^2 + y^2$  é igual a distância entre os transdutores ao quadrado.

$$\langle E(x, y, t) \rangle = \frac{P_0}{4D\pi t} e^{-(x^2+y^2)/(4Dt)} e^{-\sigma t} \quad (12)$$

Um problema em domínio  $\beta$  bidimensional (2D) também pode ser classificado como uma placa finita, assumindo que o espaço é limitado e que o corpo de prova possui dimensões  $a$  (comprimento) e  $b$  (altura). Essa consideração foi adotada por Ramamoorthy, Kane e Turner (2004), Seher *et al.* (2013), In *et al.* (2013) e In *et al.* (2016), sendo a solução analítica descrita pela Equação (13).

$$\begin{aligned} \langle E(x, y, t) \rangle = P_0 e^{-\sigma t} \{ & 1 + [g(x, x_0; a) + g(y, y_0; b)] \\ & + [g(x, x_0; a)g(y, y_0; b)] \}, \forall (x, y) \in \beta \end{aligned} \quad (13)$$

A função  $g(x, x_0; a)$  é apresentada na Equação (14)

$$g(x, x_0; a) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi x_0}{a}\right) e^{-D(n\pi/a)^2 t} \quad (14)$$

Considerando a influência das três dimensões do corpo de prova na propagação da onda ultrassônica, tem-se que o domínio  $\beta$  é tridimensional (3D) e a estrutura é caracterizada como um bloco infinito ou de dimensões  $a$  (comprimento),  $b$  (altura) e  $c$  (espessura). Conforme apresentado por Deroo *et al.* (2010), Planès e Larose (2013), Ahn *et al.* (2019) e Zhan, Jiang e Jiang (2019), a solução para um domínio 3D infinito é definida pela Equação (15).

$$\langle E(x, y, z, t) \rangle = \frac{P_0}{8(D\pi t)^{3/2}} e^{-(x^2+y^2+z^2)/(4Dt)} e^{-\sigma t} \quad (15)$$

Por fim, Deroo *et al.* (2010) apresenta a solução para um domínio tridimensional finito, de acordo com a Equação (16).

$$\begin{aligned}
\langle E(x, y, t) \rangle = & P_0 e^{-\sigma t} \{1 + [g(x, x_0; a) + g(y, y_0; b) + g(z, z_0; c)] \\
& + [g(x, x_0; a)g(y, y_0; b)g(z, z_0; b)] \\
& + [g(x, x_0; a)g(y, y_0; b) + g(x, x_0; a)g(z, z_0; c) \\
& + g(y, y_0; b)g(z, z_0; c)]\}, \forall (x, y, z) \in \beta
\end{aligned} \tag{16}$$

Apesar das definições apresentadas pelos respectivos autores para justificar as soluções escolhidas, a escolha da solução analítica ainda é intrínseca ao entendimento de cada autor, uma vez que não há limites previamente estabelecidos pela literatura científica para classificar as relações entre as dimensões. Na Tabela 2 estão apresentadas as dimensões das amostras analisadas pelas diferentes equações em cada estudo. Ressalta-se que os autores citados no decorrer do capítulo e que não constam na Tabela 2, não definiram as dimensões dos corpos de prova analisados em seus respectivos estudos.

Tabela 2 – Tabela comparativa entre dimensões e soluções analíticas utilizadas em diferentes pesquisas.

<b>Autores</b>	<b>Dimensões das Amostras (cm)</b>	<b>Solução Analítica</b>
Yim <i>et al.</i> (2016)	10 (diâmetro) x 4	1D
Ramamoorthy, Kane e Turner (2004)	60 x 60 x 20	2D FINITA
Quiviger <i>et al.</i> (2013)	15 x 15 x 60	2D INFINITA
In <i>et al.</i> (2013)	12,7 x 12,7 x 45,7	2D FINITA
Seher (2013)	30,48 x 40,64 x 68,58	2D FINITA
In <i>et al.</i> (2016)	25,4 x 15,2 x 243,8	2D FINITA
Deroo <i>et al.</i> (2010)	75 x 75 x 46	3D FINITA E INFINITA
Ahn <i>et al.</i> (2019)	30 x 30 x 60	3D INFINITA
Zhan, Jiang e Jiang (2019)	596 x 87 x 30	3D INFINITA

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

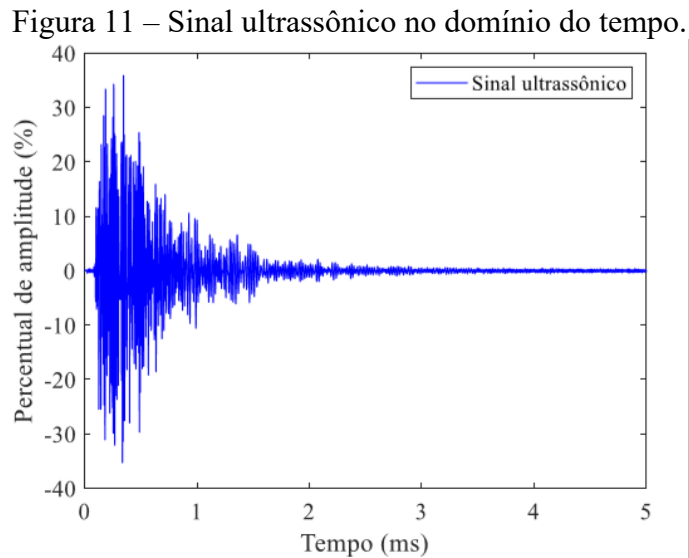
Segundo Deroo *et al.* (2010), a tendência de comportamento dos parâmetros difusos obtidos por equações finitas e infinitas são semelhantes. Porém, as soluções finitas apresentam barras de erros maiores, quando comparadas com as soluções infinitas. Os autores ainda ressaltaram que as variações dos domínios finitos decorrem da complexidade do modelo e das incertezas associadas a ele.

Ahn *et al.* (2019) citam que a escolha pela equação infinita se deve ao fato da amostra ser suficientemente grande, desconsiderando, assim, os efeitos de contorno. Porém, os efeitos de contorno ou borda em análises difusas são poucos discutidos na literatura científica. Supõem-

se que a distância dos transdutores a borda da amostra analisada interfira diretamente no efeito de contorno, tanto em relação a escolha da equação de aproximação quanto no caminhamento e atenuação da onda ultrassônica.

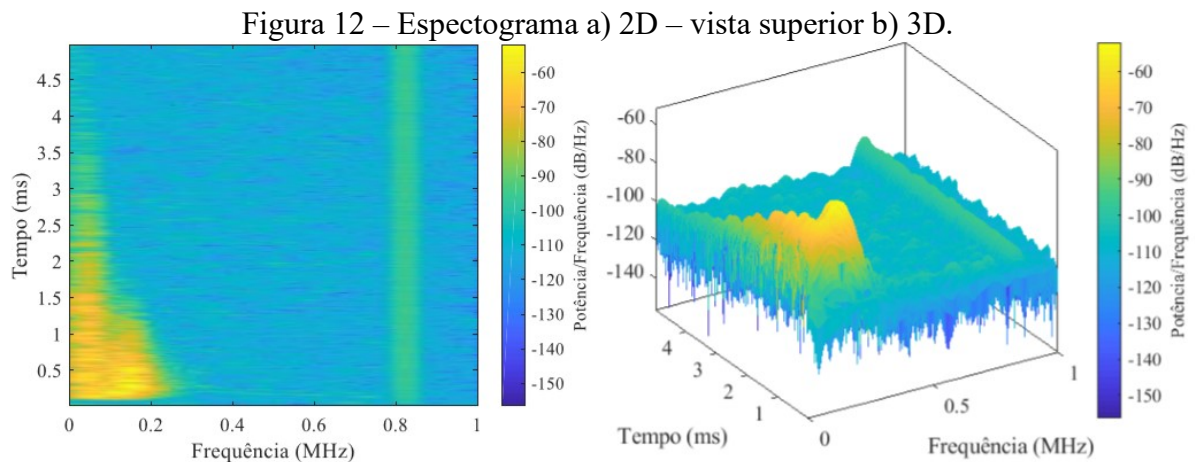
### 3.1.2 Processamento do Sinal Ultrassônico

Para a obtenção da energia espectral  $\langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle$  a partir do sinal ultrassônico medido no domínio do tempo (Figura 11), é necessária a realização da Análise Tempo-Frequência, que consiste em um procedimento para processamento de sinais. A partir do ajuste entre as soluções experimentais e analíticas, determinam-se, então, os parâmetros difusos: difusividade, dissipação e  $P_0$ . O procedimento detalhado de obtenção dos parâmetros foi descrito por diversos autores, citados ao longo da contextualização da difusão ultrassônica.



De maneira simplificada, os sinais de ondas difusas no domínio do tempo são transformados por uma Transformada Rápida de Fourier para o domínio da frequência. Previamente à transformação, o sinal no domínio do tempo, é arbitrariamente dividido em janelas de tempo de largura  $\Delta t$ , centradas em um tempo  $t_c$  e com uma superposição específica entre janelas consecutivas. O formato de onda de cada janela de tempo é multiplicado por uma janela de Hamm, com o objetivo de suavizar as bordas e reduzir ressaltos laterais artificiais no sinal. A partir da suavização, realiza-se a Transformada Rápida de Fourier no tempo em cada janela separada, e em seguida, o resultado obtido para cada uma dessas janelas é elevado ao

quadrado, gerando um espectro de potência. O espectrograma obtido tem dimensões de tempo, frequência e potência espectral, conforme apresentado na Figura 12.

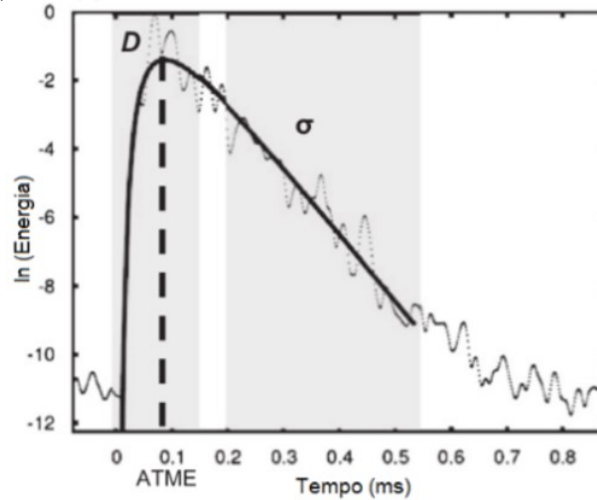


Fonte: Martins (2019).

A partir da determinação do espectro de potência, a densidade de energia espectral de cada janela de tempo  $\Delta t$  é determinada para certas frequências. Para isso, integra-se o espectro de potência sobre uma banda de frequência de largura  $\Delta f$ , centrada na frequência de interesse  $f_c$ . Assim, é obtida uma tabela de valores de densidade de energia espectral associada a cada um dos instantes discretos no tempo, correspondentes ao centro da janela temporal  $t_c$ .

Para a obtenção dos parâmetros de difusão ultrassônica, realiza-se um ajuste da curva de densidade de energia espectral experimental (determinada pela análise tempo-frequência), à uma das soluções analíticas apresentadas anteriormente. O ajuste é feito utilizando funções de regressão, em uma plotagem logarítmica, conforme o gráfico apresentado na Figura 13. Assim como a escolha da solução analítica, a função de regressão também varia entre os autores e os domínios. In *et al.* (2016) e Martins (2019) apresentaram a função não-linear “Isqnonlin” no Matlab como ajuste para a solução analítica 3D de domínio finito. Para as soluções analíticas 3D e 2D no domínio infinito, Becker, Jacobs e Qu (2003), Deroo *et al.* (2010), Ahn *et al.* (2019), Martins (2019) e Tinoco (2019) apresentaram o ajuste pelo método dos mínimos quadrados.

Figura 13 - Representação da densidade espectral de energia em função do tempo (linha pontilhada) e aproximação por uma solução analítica (linha contínua).

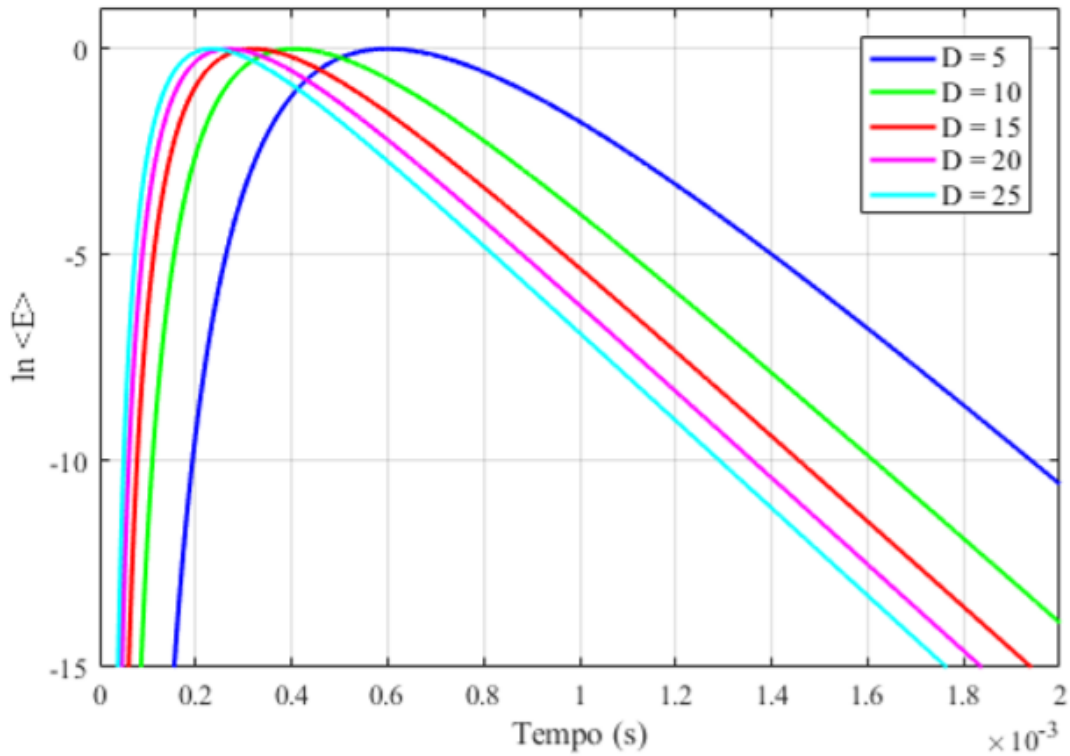


Fonte: Adaptado de Quiviger *et al.* (2012).

O processo de ajuste da curva de densidade de energia espectral resulta em três parâmetros que caracterizam o fenômeno difuso, obtidos a partir das soluções analíticas: difusividade  $D$ , dissipação  $\sigma$  e  $P_0$  (que não está representado graficamente).

A primeira parte do sinal, ou seja, a parte ascendente da curva apresentada na Figura 13, é governada pela difusividade  $D$ , que está relacionada ao tempo de chegada do pico máximo de energia e descreve o quão rápido esta energia é transferida no/atraves do material. A difusividade representa apenas um número reduzido de pontos em relação ao sinal total de energia, o que torna esse parâmetro sensível a variação no nível de ruído e a escolha do ponto de início de ajuste dos dados (QUIVIGER *et al.*, 2012). Para melhor caracterização do parâmetro da difusividade, na Figura 14 está representado o comportamento da densidade de energia de um campo ultrassônico difuso para diversos valores de difusividade, em  $m^2/s$ , fixando  $\sigma = 10 \text{ ms}^{-1}$ ,  $P_0 = 1 \text{ V}^2/\text{Hz}$  e considerando a solução analítica 3D infinita, com 30 *cm* de distância entre os transdutores.

Figura 14 - Influência da difusividade na densidade de energia.



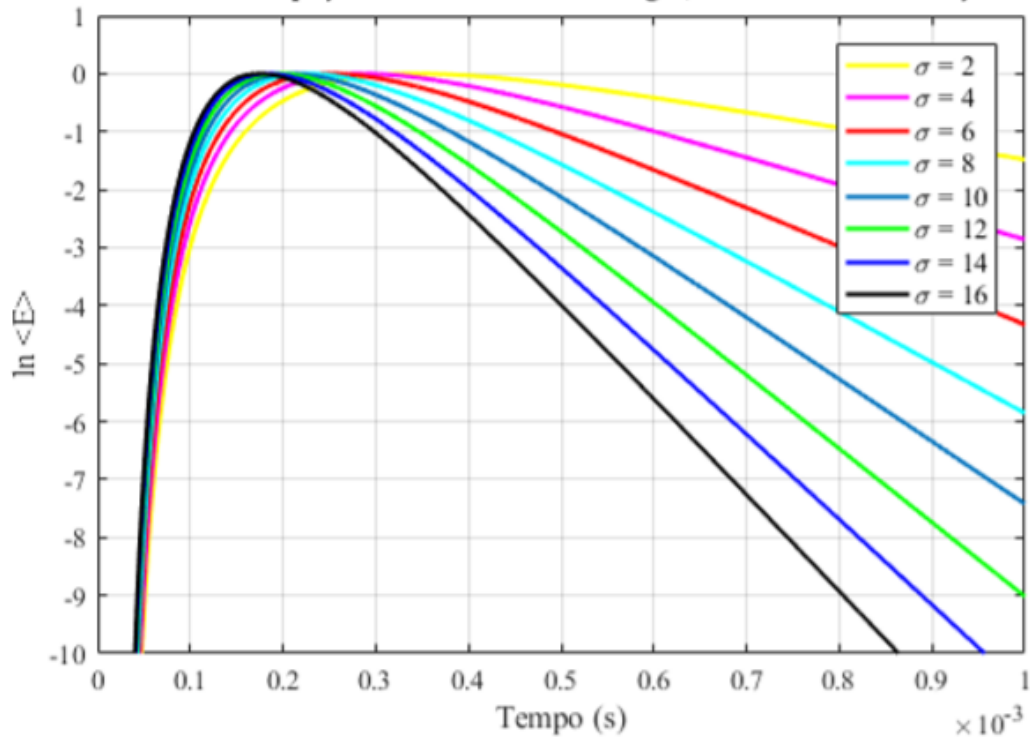
Fonte: Tinoco (2019).

A dissipação  $\sigma$  descreve a inclinação do decaimento logarítmico da densidade de energia em tempos tardios, representando ondas mais íngremes quanto maior for este coeficiente. Para melhor descrição da dissipação, na Figura 15 está representado o comportamento da densidade de energia de um campo ultrassônico difuso para diversos valores do coeficiente de dissipação, fixando os demais parâmetros da equação da difusão ( $D = 30 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $P_0 = 1 \text{ V}^2/\text{Hz}$ ,  $r = 30 \text{ cm}$ ) para a solução analítica 3D infinita.

Na Figura 13 ainda é possível observar o ATME, o qual é obtido a partir dos parâmetros de difusividade e dissipação. O estudo desse parâmetro se iniciou apenas com Ramamoorthy, Kane e Turner (2004) e desde então apresenta resultados satisfatórios nas análises da difusão. O ATME depende dos parâmetros  $\sigma$  e  $D$ , uma vez que diminui com o aumento dos valores de ambos os parâmetros (QUIVIGER *et al.*, 2012). Porém, contrariamente à sensibilidade da difusividade, o tempo de chegada do pico de amplitude máxima da energia difusa, é um parâmetro representativo de todo o conjunto de pontos de dados do sinal, e por isso, menos influenciado pelo nível de ruído.



Figura 15 - Influência da dissipação na densidade de energia.



Fonte: Tinoco (2019).

O parâmetro  $P_0$  (parâmetro resultante da difusão ultrassônica não representado graficamente) é um fator relacionado a magnitude do pulso ultrassônico emitido pela fonte (DEROO *et al.*, 2010), ou seja, depende da energia inicial depositada pela fonte. Esse parâmetro não se mostrou necessário para a caracterização do material (BECKER, JACOBS & QU, 2003) devido à incerteza atrelada aos seus resultados. Para a determinação exata desse fator é necessário um processo extenso de calibração (WEAVER, 1998; ANUGONDA, WIEHN & TURNER, 2001).

A densidade espectral de energia experimental resultante,  $\langle \hat{E}(\mathbf{r}, t, f) \rangle$ , não é considerada a exata densidade espectral de energia ultrassônica. Difere-se daquela 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. Apesar desse fator ser desconhecido, presume-se que ele seja constante (WEAVER, 1998). Assim,  $\langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle$  é a média de valores de  $\langle \hat{E}(\mathbf{r}, t, f) \rangle$  obtidos a partir de diferentes configurações da difusão. Considera-se que as configurações são estatisticamente independentes, a partir de um número considerável de leituras realizadas, esse média converge efetivamente para  $\langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle$  (BECKER, JACOBS E QU, 2003).

As flutuações da densidade espectral de energia experimental podem ser estimadas, segundo Weaver e Sachse (1995) e Waver (1998), pela estatística de Gauss, considerando um regime praticamente estacionário em cada janela de tempo. Dessa forma, a variância  $\sigma^2$  pode ser estimada em função de  $\Delta t$  e  $\Delta f$  pela Equação (17).

$$\sigma^2 = \frac{1}{\Delta t \Delta f} \quad (17)$$

A Equação (17) foi inicialmente proposta para janelas de tempo retangulares. Assim, para os casos em que são aplicados a janela de Hann, ou seja, em que se assume pesos menores para os valores fora dos pontos centrais da janela de tempo, utiliza-se um fator de normalização  $\alpha$ . Este fator, apresentado na Equação (18), considera a diferença entre a janela retangular e a de Hann.

$$\alpha = \frac{\sum_0^{n-1} w(n)}{\sum_0^{n-1} r(n)} = \frac{1}{n} \sum_0^{n-1} w(n) \quad (18)$$

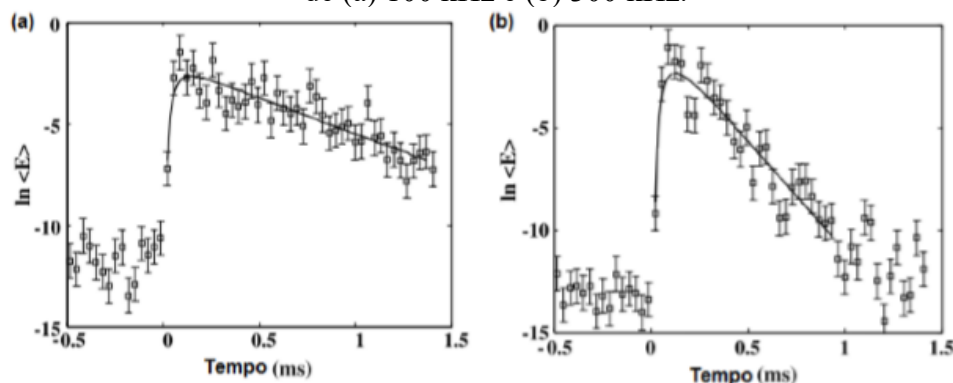
Onde  $n$  é o número de pontos da janela de tempo,  $w(n)$  é a janela de Hann e  $r(n)$  é a janela retangular.

Com isso, a variância  $\sigma^2$  é modificada e mostra-se que a densidade de energia experimental flutua para longe da média do conjunto. A flutuação corresponde a uma parte de  $\alpha$  vezes a raiz quadrada do produto entre  $\Delta t$  e  $\Delta f$ , conforme a Equação (19).

$$\langle E(\mathbf{r}, t, f) \rangle = \langle \hat{E}(\mathbf{r}, t, f) \rangle \pm \frac{1}{\sqrt{\alpha \Delta t \Delta f}} \langle \hat{E}(\mathbf{r}, t, f) \rangle \quad (19)$$

Ressalta-se que esse desvio não caracteriza erros, mas flutuações previstas que são causadas pela aleatoriedade do meio. Como mostrado por Anugonda, Wiehn e Turner (2001), que obtiveram flutuações esperada de 84%, na Figura 16 pode ser observado a boa qualidade do ajuste, uma vez que os desvios se encontram de maneira aleatória em torno da curva.

Figura 16 - Resultado experimental e ajuste à solução analítica para frequência de excitação de (a) 100 kHz e (b) 300 kHz.



Fonte: Adaptado de Anugonda, Wiehn e Turner (2001).

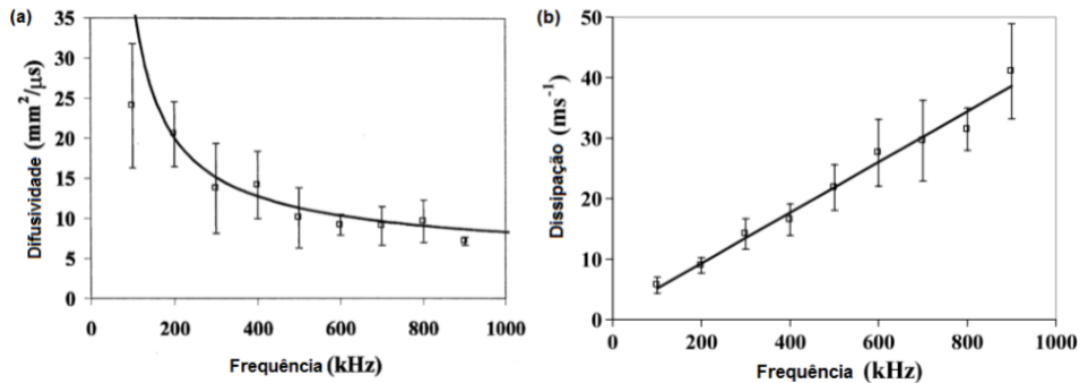
### 3.2 APLICAÇÕES DO MÉTODO DE ULTRASSOM DIFUSO EM ELEMENTOS DE CONCRETO

Com o intuito de contextualizar e viabilizar o estudo proposto nesse trabalho, a seguir serão evidenciadas as pesquisas mais relevantes para a aplicação do método de ultrassom difuso na caracterização da matriz de concreto, considerando o avanço da idade do concreto, influências relacionadas a geometria da amostra e diferentes heterogeneidades. Além disso, serão apresentados os trabalhos desenvolvidos no grupo de pesquisa no qual se enquadra o presente trabalho relacionados ao método da difusão ultrassônica.

O primeiro estudo sobre o método da difusão ultrassônica no concreto encontrado na literatura científica foi apresentado por Anugonda, Wiehn e Turner (2001). O objetivo do estudo era determinar experimentalmente os coeficientes de difusividade e dissipação, ambos parâmetros da difusão ultrassônica, no concreto. As medições ultrassônicas foram realizadas em corpos de prova cilíndricos, utilizando transdutores de banda larga em uma faixa de frequência de 100 a 900 kHz, com incrementos de 100 kHz.

A densidade de energia espectral foi determinada pela análise tempo-frequência com  $\Delta t = 23,6 \mu s$  e  $\Delta f = 60 kHz$ , considerando a solução analítica 1D. Os resultados da energia difusa em função do tempo obtidos experimentalmente e pela solução analítica foram exemplificados na Figura 16. Os parâmetros de difusividade e dissipação foram obtidos em função da frequência de excitação, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Parâmetros de difusão em função da frequência de excitação em elementos de concreto: (a) difusividade e (b) dissipação



Fonte: Adaptado de Anugonda, Wiehn e Turner (2001).

As barras de erro representam as flutuações das difusividades e /ou dissipação em torno das médias medidas em posições e corpos de prova diferentes. O ajuste dos dados experimentais às curvas do modelo teórico foi considerado razoavelmente bom para o intervalo de frequência examinado. Assim, as tendências identificadas por Anugonda, Wiehn e Turner (2001) são utilizadas atualmente para avaliar a sensibilidade dos resultados obtidos em pesquisas que analisam os parâmetros de difusão ultrassônica.

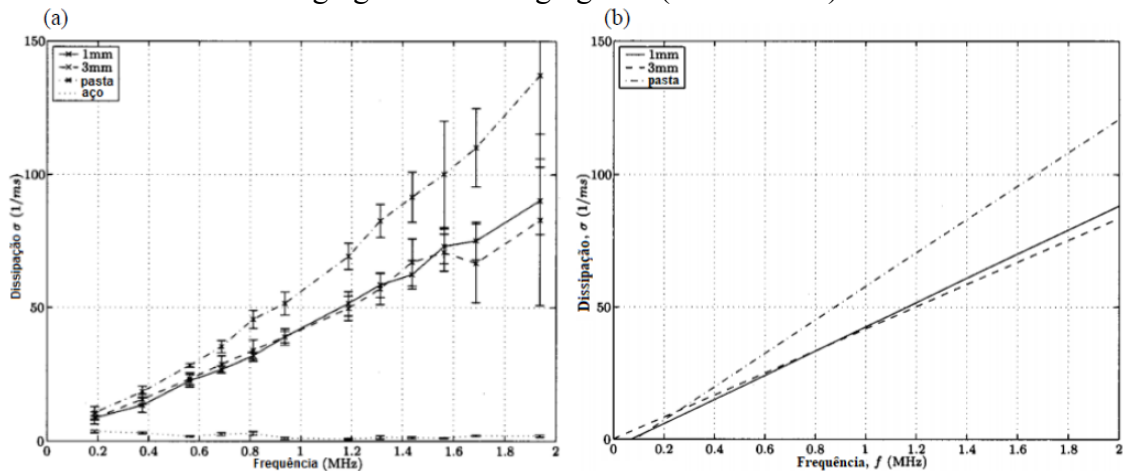
De forma a complementar a primeira pesquisa, que mostrou resultados satisfatórios quanto a caracterização do concreto pelo método da difusão, Becker, Jabocs e Qu (2003) pesquisaram a influência do diâmetro e da distribuição de agregados na pasta de cimento aos parâmetros de difusão da onda ultrassônica.

Becker, Jabocs e Qu (2003) realizaram medições da onda ultrassônica em amostras cilíndricas com 76 mm de diâmetro e comprimento variando de 14 a 16 mm, compostas por uma matriz de pasta de cimento com relação a/c de 0,4 e esferas de vidro com 1 e 3 mm de diâmetro, representando um agregado artificial. As esferas foram adicionadas em frações volumétricas de 22, 32 e 41%. As medições também foram realizadas em uma amostra de aço, a qual foi considerada como referência.

Os transdutores utilizados eram de banda larga em uma faixa de frequência de 200 a 2000 kHz, posicionados no modo de transmissão direta, porém com um deslocamento de 30 mm entre os centros, evitando o efeito da porção balística do sinal no receptor.

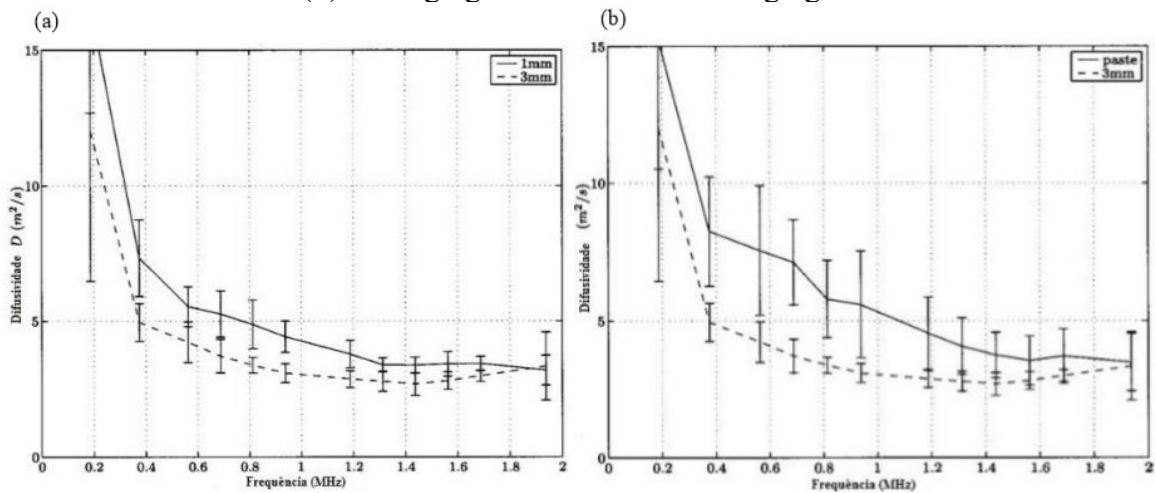
Os parâmetros de dissipação e difusividade foram recuperados pela solução analítica 2D infinita, com  $\Delta t = 6 \mu\text{s}$  e  $\Delta f = 300 \text{ kHz}$ , obtendo os resultados apresentados na Figura 18 e na Figura 19, respectivamente.

Figura 18 - 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: Adaptado de Becker, Jacobs e Qu (2003).

Figura 19 - 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: Adaptado de Becker, Jacobs e Qu (2003).

Conforme observado na Figura 18, o desvio padrão aumentou com a frequência, mais expressivamente acima de 1500 kHz. Ainda, observou-se uma dependência linear da dissipação com a frequência em todas as amostras cimentícias. A presença das esferas na pasta de cimento diminuiu os valores de dissipação, porém sem apresentar variações quanto ao diâmetro.

Na análise da Figura 19, constatou-se a influência do diâmetro da esfera na difusividade, uma vez que as amostras com incorporação das esferas de maior dimensão apresentaram menor difusividade. O comportamento é explicado pois as esferas de 3 mm levam a uma maior dispersão nas frequências mais baixas (comprimento de onda na mesma escala da esfera), retardando o processo de difusão e, conseqüentemente, a difusividade. Nas frequências

mais altas (acima de 1500 kHz), os valores da difusividade se aproximaram para ambas as dimensões das esferas, uma vez que a onda foi dispersa pelos dois diâmetros das esferas. No entanto, a fração volumétrica não ocasionou mudanças no comportamento da difusividade, visto que são diferenças pequenas e estão no intervalo do erro de medição e processamento.

Na sequência cronológica dos estudos do ultrassom difuso, Ramamoorthy, Kane e Turner (2004), Deroo *et al.* (2010) e Quiviger *et al.* (2012) comprovaram a eficiência do método do ultrassom difuso na detecção de danos por fissuração no concreto, abrindo caminho para que In *et al.* (2013) estudassem o monitoramento e a avaliação da autocura em concreto utilizando ultrassom difuso.

A influência da autocura do concreto na difusão está relacionada ao processo de hidratação do cimento. Os autores realizaram medições da onda ultrassônica em amostras de dimensões 12,7 cm x 12,7 cm x 45,7 cm, produzidas com uma relação a/c de 0,3, variando a substituição parcial de cimento por escória e metacaulim. Para cada variação de mistura foram analisadas duas amostras sem fissuração, duas com fissuração por tração e duas com fissuração por flexão.

As medições ultrassônicas foram realizadas pelo modo de transmissão indireto, com espaçamento de 60 mm entre os transdutores. Nos corpos de prova com presença de fissuras, cada transdutor foi posicionado a 30 mm de distância da fissura. Ressalta-se que os transdutores foram suficientemente afastados das bordas das amostras para não haver influência do efeito de borda. Os sinais foram medidos com transdutores de frequência de 500 kHz, com transdutor receptor pontual, uma vez que foi acoplado um tronco de cone no transdutor receptor. O transdutor foi removido e recolocado na mesma posição três vezes para gerar um conjunto de dados confiáveis.

Os parâmetros de difusividade e ATME foram recuperados pela solução analítica 2D finita, com  $\Delta t = 15 \mu s$  e  $\Delta f = 100 kHz$ . Notou-se que houve influência do tipo de mistura nos parâmetros iniciais, uma vez que o concreto sem adições apresentou menor difusividade. Segundo os autores, a substituição do cimento por escória e metacaulim tornou a microestrutura mais densa, com uma zona de transição interfacial pasta-agregado menos pronunciada, garantindo uma difusão mais rápida da onda (maior difusividade).

Os autores constataram o aumento da difusividade nas amostras sem fissuras ao longo do tempo, sugerindo que a hidratação do aglomerante continuava a ocorrer. Os valores de difusividade a longo prazo em amostras fissuradas foram estatisticamente equivalentes aos das amostras não fissuradas, comprovando a completa cicatrização de pequenas fissuras. Nesse

contexto, concluiu-se que a difusividade é um parâmetro confiável para a avaliação da hidratação e autocura do concreto.

No entanto, o ATME diminuiu com o processo de autocura e apresentou maiores flutuações nas medições ao longo do tempo. Segundo os autores, o ATME depende expressivamente de onde ocorre a autocura na face da fissura, podendo ocasionar caminhos diferentes da energia difusa com o tempo. Ainda, o ATME pode ser influenciado por pequenas alterações no espaçamento entre os transdutores, contribuindo para um erro de medição e maiores flutuações desse parâmetro.

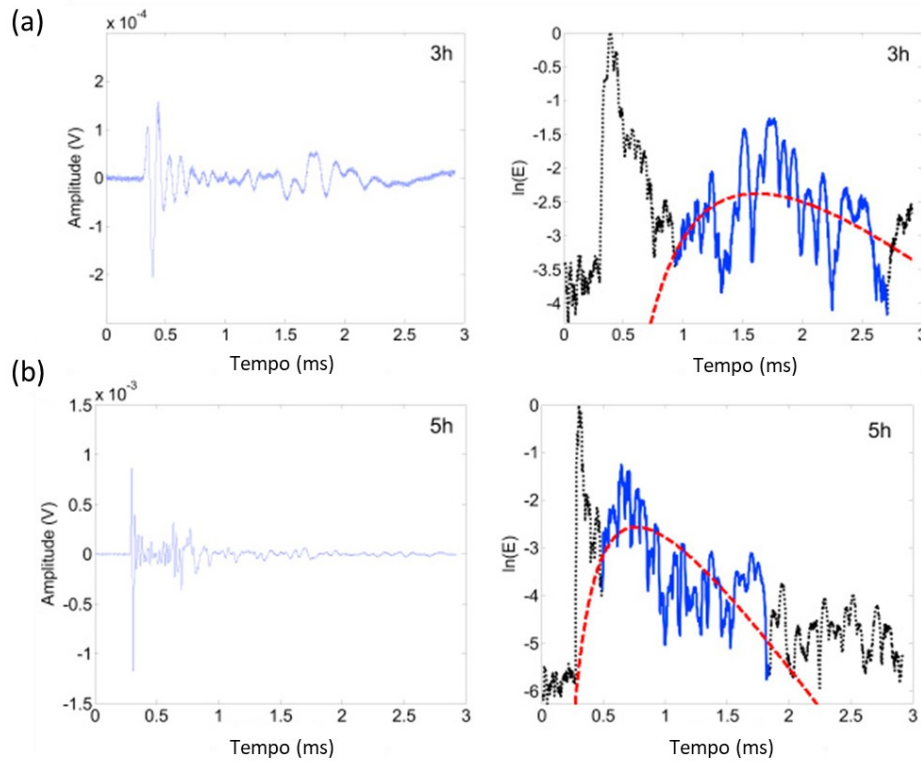
Dando sequência aos trabalhos que relacionam hidratação aos parâmetros da difusão, Yim, An e Kim (2016) estudaram o método do ultrassom difuso na investigação da evolução da hidratação do cimento nas primeiras idades.

As medições foram realizadas em pastas de cimento com relação a/c de 0,35, 0,40 e 0,50, em um copo de vidro de 100 mm de diâmetro e 40 mm de altura. Um transdutor emissor de contato com frequência central de 100 kHz foi acoplado abaixo do copo e o transdutor receptor foi substituído por um vibrômetro Doppler a laser (para evitar o cancelamento de fase) localizado na superfície superior da amostra. As leituras foram realizadas de 3 a 8h após a mistura, com variações de 30 min até 5h e de 1h até 8h.

Na Figura 20 estão exemplificados os sinais brutos medidos em três e cinco horas para a mistura com relação a/c 0,40 e sua densidade espectral de energia de acordo com o processo de hidratação. As linhas pretas pontilhadas são formas de onda medidas, as linhas azuis sólidas indicam componentes incoerentes e as linhas vermelhas tracejadas são ajustes em curva para os componentes incoerentes. Os parâmetros foram recuperados pela solução analítica 1D, com  $\Delta t = 20 \mu s$  e  $\Delta f = 50 kHz$ .

Com a evolução da hidratação, o sinal da onda se propagou mais rápido, afetando assim, a velocidade do pulso ultrassônico baseado na onda coerente e os parâmetros de difusividade e dissipação, provenientes da análise da onda incoerente.

Figura 20 - Sinal medido da pasta de cimento com  $a/c = 0,4$  e sua densidade espectral de energia : (a) 3 h; (b) 5 h após a mistura.



Fonte: Adaptado de Yim, An e Kim (2016).

Os resultados encontrados pelos autores mostraram que a VPU aumentou ao decorrer do tempo. De maneira análoga, os parâmetros de difusividade e dissipação também aumentaram com a evolução da hidratação do cimento. Os autores ainda concluíram que a relação  $a/c$  influenciou nos resultados obtidos, uma vez que relações mais altas resultaram na diminuição da difusividade e dissipação.

Diante do estudo apresentado por Yim, An e Kim (2016), os parâmetros de difusividade e dissipação podem ser considerados sensíveis e capazes de detectar a evolução da hidratação da pasta de cimento até oito horas após a mistura.

No GPEND/UFSC, grupo de pesquisa no qual este trabalho está inserido, o método da difusão ultrassônica foi aplicado nas pesquisas de Martins (2019), Tinoco (2019) e Tinoco e Pinto (2021). Para a aplicação do método, o grupo de pesquisa desenvolveu um programa computacional no *software* MATLAB, que realiza o ajuste entre a densidade de energia espectral experimental e as soluções analíticas disponíveis para a equação da difusão ultrassônica.

Martins (2019) avaliou o preenchimento com sistema epóxi de fendas induzidas em estruturas de concreto utilizando o método de difusão da energia de ondas ultrassônicas, através

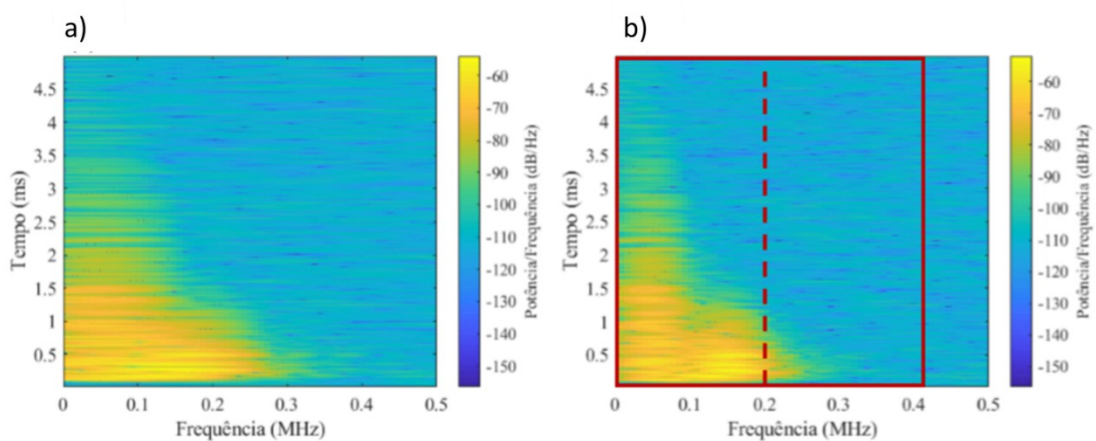


dos parâmetros de difusividade, dissipação e ATME. As análises foram realizadas no programa experimental realizado por Souza (2017), em prismas de concreto com fendas superficiais induzidas de 50 mm, 75 mm, 100 mm, 150 mm e 220 mm, as quais foram preenchidas com 0%, 33%, 67% e 100% de epóxi.

As leituras ultrassônicas foram realizadas com transdutores de 200 kHz, espaçados em 200 e 300 mm. Os parâmetros da difusão foram determinados pelas soluções analíticas 3D finita e infinita. Foram definidos como parâmetros de entrada para ambos os domínios:  $\Delta t = 32 \mu s$  (que corresponde a 64 pontos do sinal discreto no tempo, uma vez que  $f_s = 2 MHz$  e  $T = 0,5 \mu s$ ), superposição de 90% entre janelas de tempo consecutivas,  $\Delta f = 400 kHz$  e  $f_c = 2 MHz$  (frequência de excitação dos transdutores). Ainda, para o domínio finito, o ponto inicial para ajuste foi definido como  $(D, \sigma, P_0) = (50, 50, 50)$ , respectivamente em  $m^2/s$ ,  $s^{-1}$  e  $V^2/Hz$ , e o limite superior do somatório como  $n = 500$ .

Para ambos os domínios, a determinação do  $\Delta t$  foi realizada com base no efeito de janelamento (formato e comprimento da janela) e na resolução do sinal no domínio da frequência, observados a partir do espectrograma. Foram analisados valores de  $\Delta t$  iguais a 8, 16, 32 e 64 e 128 e 512 pontos, visando otimizar o cálculo da transformada rápida de Fourier. Os resultados para  $\Delta t$  de 32 e 64 pontos estão apresentados na Figura 21.

Figura 21 – Espectrogramas das análises de sinal para 0% de preenchimento com  $\Delta t$  igual a a) 32 pontos e b) 64 pontos.



Fonte: Adaptado de Martins (2019).

Diante das análises, o autor optou por utilizar  $\Delta t = 32 \mu s$ , uma vez que este foi considerado um ponto de equilíbrio do vazamento espectral e da perda de resolução do sinal no domínio do tempo. Analisando os espectros de potência em relação à largura da banda de frequência,  $\Delta f$ , o autor concluiu que a densidade espectral de potência se concentrou

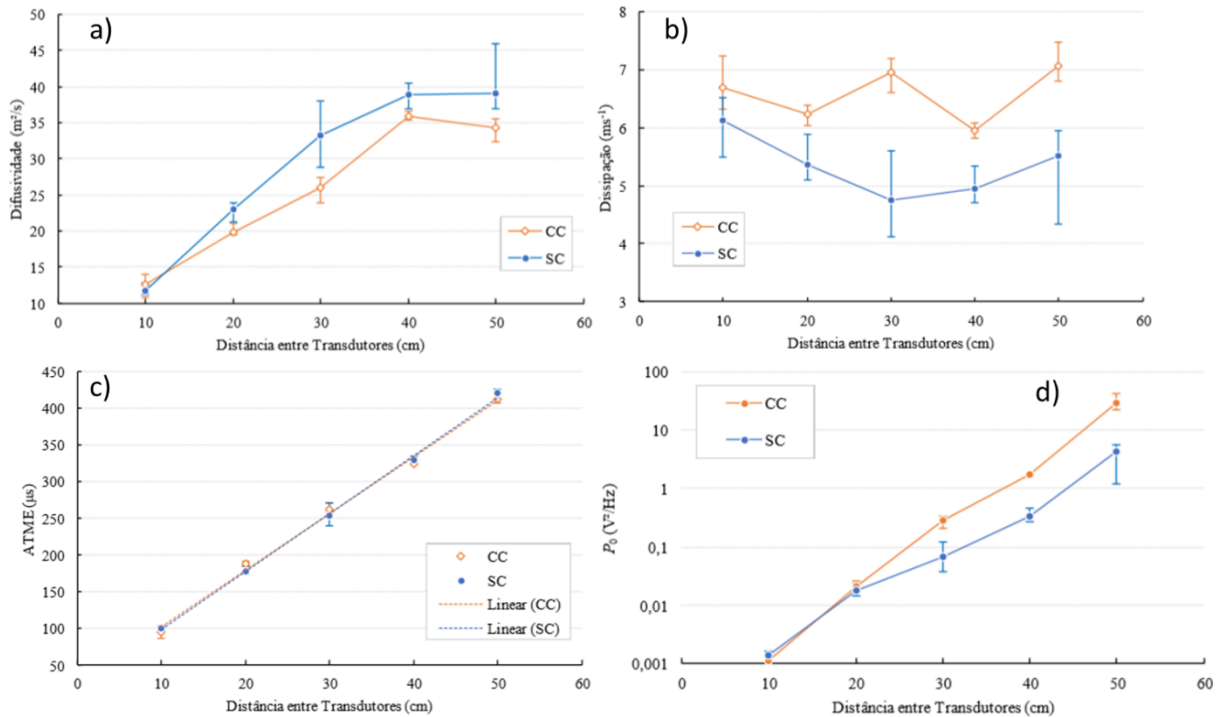
principalmente entre 0,1 e 0,2 MHz (linha pontilhada vermelha na letra b) da Figura 21), se espalhando desde frequências próximas de zero até valores que chegam a ultrapassar 0,3 MHz. Dessa forma, o autor adotou  $\Delta f = 400$  kHz (linha contínua vermelha na letra b) da Figura 21), como forma de considerar todo o espectro de potência do sinal no processo de integração para a obtenção da densidade de energia espectral.

A partir das análises realizadas pelo método da difusão, de maneira geral, o autor concluiu que os resultados mostraram a sensibilidade do método para avaliação da presença do epóxi nos preenchimentos parciais ou no preenchimento total. Porém os resultados não permitiram inferir sobre o valor da porcentagem preenchida. Assim, o autor destacou o potencial do Ultrassom Difuso para avaliação não destrutiva de elementos de concreto.

Por sua vez, Tinoco (2019) e Tinoco e Pinto (2021) avaliaram a perda de rigidez de vigas de concreto armado submetidas ao ensaio de flexão por meio do ensaio de ultrassom e da aplicação do método de aproximação da difusão da energia de ondas ultrassônicas. Para tal, foram moldadas vigas de concreto armado de seção 15 cm x 22 cm e comprimento de 170 cm, as quais 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.

A determinação da distância entre os transdutores foi realizada com base em ensaios de ultrassom para verificar a influência da distância entre os transdutores e do uso do receptor pontual nos parâmetros de difusão. Os ensaios foram realizados em cinco posições diferentes, com distâncias de 10, 20, 30, 40 e 50 cm entre os eixos dos transdutores. Foram realizadas 10 leituras com os transdutores de 200 kHz e 10 leituras com a utilização do transdutor receptor pontual, através do acoplamento de um tronco de cone de menor dimensão no mesmo transdutor receptor. 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. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 22. Ressalta-se que os parâmetros de entrada utilizados para o método da difusão foram semelhantes à pesquisa de Martins (2019), apesar de também terem sido realizadas verificações.

Figura 22 – Comportamento dos parâmetros da difusão em função da distância entre os transdutores, sendo CC = com cone (transdutor receptor pontual) e SC = sem cone, para a) difusividade, b) dissipação, c) ATME e d)  $P_0$ .



Fonte: Adaptado de Tinoco (2019).

A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que o aumento da distância e a utilização do transdutor pontual apresentaram maiores valores para a difusividade. Já em relação a dissipação, para as leituras realizadas com a utilização do transdutor pontual, a dissipação não teve um padrão bem definido; enquanto que para os casos sem o acoplamento do cone no transdutor, o valor da dissipação diminuiu até 30 cm, voltando a crescer nas distâncias de 40 e 50 cm. O ATME, por sua vez, apresentou as menores variações entre as duas configurações de transdutores, sendo que o parâmetro cresceu linearmente com o aumento da distância nos dois casos. Por fim, o  $P_0$  apresentou um crescimento aproximadamente exponencial com o aumento da distância, porém foi o parâmetro com as maiores variações, explicitamente nas leituras sem a utilização do transdutor pontual.

Assim, os autores optaram por adotar o espaçamento de 30 cm entre o eixo dos transdutores. Ainda, optou pela utilização do cone de aço acoplado ao transdutor receptor, pois o uso do cone apresentou uma menor dispersão dos resultados.

A partir dessas definições, os autores realizaram o ensaio de ultrassom durante o ensaio de flexão a quatro pontos nas vigas. As leituras do ensaio de ultrassom, foram feitas em

intervalos de 20 segundos por transdutores de frequência de 200 kHz, obtendo formatos de ondas distintos para cada etapa de carregamento. Dessa forma, os autores observaram 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.

### 3.3 FATORES INFLUENCIADORES NOS PARÂMETROS DE DIFUSÃO

Diante das pesquisas relacionadas ao método da difusão ultrassônica encontradas na literatura científica, detectou-se a influência de inúmeras variações experimentais e de análise no comportamento dos parâmetros difusos. Dessa forma, a seguir será apresentado um compilado das influências mais relevantes para a pesquisa em estudo, considerando, também, as pesquisas detalhadas anteriormente. De maneira geral, as influências serão classificadas como devidas à natureza do material (presença de agregados, fissuras, entre outros) e a fatores externos (localização dos transdutores, frequências, pressão, análise tempo-frequência, entre outros).

#### 3.3.1 Natureza do Material

##### 3.3.1.1 Fissuração

Na análise do concreto como material, a difusividade e o ATME se mostraram parâmetros sensíveis a presença de fissuras e microfissuras na estrutura. Resultados obtidos por Tinoco (2019), Tinoco e Pinto (2021) e In *et al.* (2013) mostraram que o ATME aumenta e a difusividade diminui com o aumento da fissuração. Porém, apesar de observar uma tendência de diminuição da dissipação com o aumento da fissuração, Tinoco (2019), Tinoco e Pinto (2021) e Deroo *et al.* (2010) concluíram que a dissipação não mostrou um comportamento claro ao aumento da fissuração.

##### 3.3.1.2 Incorporação de Agregados

Considerando a inserção de agregados artificiais na pasta de cimento, a difusividade tende a aumentar com o aumento do tamanho do diâmetro máximo característico do agregado

gráudo, porém não apresenta relação com a variação do volume de agregado presente na pasta. Segundo Becker, Jacobs e Qu (2003), a influência da dimensão do agregado gráudo artificial não é percebida no parâmetro da dissipação, uma vez que esse parâmetro é sensível apenas a matriz viscoelástica da pasta de cimento e não à zona de transição interfacial pasta-agregado. No entanto, em pesquisas mais recentes, Philippidis e Aggelis (2005) e Ramaniraka *et al.* (2019) correlacionaram a absorção da onda com a zona interfacial pasta-agregado, ou seja, demonstraram que a dissipação ultrassônica pode ser influenciada pelas diferenças de classificação de agregados gráudos.

Estudos realizados por Güçlüer (2019) constataram a influência do aumento da rugosidade da superfície do agregado no aumento da velocidade do pulso ultrassônico. Dessa forma, espera-se que as características de rugosidade dos agregados e das demais heterogeneidades também exerçam influência nos parâmetros da difusão.

Ahn *et al.* (2018) ressaltaram que os efeitos da incorporação do agregado gráudo, em dimensão e proporção, devem ser investigados para possibilitar aplicações práticas do ultrassom difuso em estruturas de concreto. No entanto, não foram encontradas pesquisas na literatura científica que verifiquem a influência da dimensão e proporção de agregados gráudos reais no comportamento dos parâmetros difusos.

### 3.3.1.3 Hidratação do cimento e avanço da idade

Na análise da hidratação do cimento, a difusividade e a dissipação tendem a aumentar e o ATME a diminuir com o avanço do processo de hidratação nas primeiras idades, de acordo os resultados encontrados por In *et al.* (2013). Segundo Yim, An e Kim (2016), o aumento dos parâmetros de difusividade ultrassônica e de dissipação significa que a onda dispersa na fase fluída do concreto segue caminhos cada vez menos tortuosos com o avanço do processo de hidratação/endurecimento do concreto. Os autores ainda relacionam a relação água/cimento com a difusividade e a dissipação, demonstrando que quanto maior a relação água/cimento, menores serão ambos os parâmetros.

Apesar de relevante para inspeções em estruturas reais, não foram encontrados estudos na literatura científica que relacionem o avanço da idade do concreto após o endurecimento com os parâmetros difusos. As pesquisas existentes relacionadas ao tema englobam apenas o comportamento dos parâmetros nas primeiras idades até a fase de endurecimento, conforme supracitado.

### 3.3.2 Fatores externos ao material

#### 3.3.2.1 Posicionamento dos Transdutores e Geometria da Amostra

De acordo com a teoria da difusão na termodinâmica convencional, a difusividade e a dissipação deveriam ser independentes do espaçamento entre a fonte e o receptor. Porém, estudos realizados por Jiang *et al.* (2019), Ahn *et al.* (2019), Tinoco (2019) e Martins (2019) verificaram a dependência da distância entre os transdutores nos valores de difusividade. Segundo os autores, a difusividade tende a aumentar com o aumento do espaçamento entre os transdutores. Ahn *et al.* (2019) também constataram o aumento da dissipação (variação no espaçamento de 60 a 120 mm) e Martins (2019) e Tinoco (2019), o aumento do ATME (variação no espaçamento de 200 a 300 mm). Segundo os autores, essa sensibilidade da difusividade se justifica, uma vez que, existe uma maior probabilidade de dispersão do fluxo de energia das ondas quanto maior for o caminho de propagação, ou seja, quanto maior for a distância entre os transdutores. A influência nos demais parâmetros é justificada pelas heterogeneidades presentes no concreto serem distribuídas em um padrão não homogêneo.

Além da influência do espaçamento entre os transdutores, baseando-se nas premissas de Planès *et al.* (2014), é esperado que os parâmetros da teoria da difusão sejam sensíveis ao posicionamento da leitura ultrassônica em relação à amostra analisada, uma vez que as heterogeneidades estão espalhadas de maneira aleatória por toda a amostra de concreto. Conforme citado pelos autores, as variações nas ondas ultrassônicas dependem fortemente da posição da heterogeneidade em relação ao transdutor emissor e receptor. Como os parâmetros difusos são resultado da propagação da onda no material, os diferentes posicionamentos dos elementos dispersores em relação aos transdutores resultarão em caminhos de propagação distintos. Com diferentes interações da onda ultrassônica com as heterogeneidades, espera-se que os parâmetros difusos também sofram alterações. Apesar do pressuposto, não há estudos que comprovem e/ou quantifiquem essa influência, sendo apenas citada por alguns autores para justificar a realização de leituras em diversas posições.

Autores como Aggelis e Shiotani (2008), Aggelis e Shiotani (2012) e Ahn *et al.* (2019) realizaram leituras em 20 posições diferentes em um mesmo corpo de prova, com mesmo espaçamento entre os transdutores. Zhan, Jiang e Jiang (2019) captaram sinais de quatro transdutores emissores e vinte transdutores receptores espalhados por toda a amostra de concreto, sendo que cada transdutor receptor recebia sinais dos quatro transdutores emissores

independentemente. Apesar dos números de repetições citadas, nenhum autor explicou como foi realizada a obtenção e análise dos parâmetros difusos em relação as repetições.

Nas análises apresentadas pelos autores supracitados, apenas Ahn *et al.* (2019) citaram os coeficientes de variação (C.V.) obtidos nos resultados. Para os parâmetros da difusividade e dissipação, Ahn *et al.* (2019) obtiveram, respectivamente, C.V. entre 4 e 12% e entre 2 e 9%. Os autores analisaram os resultados de 20 posições, com a obtenção de 500 ondas ultrassônicas por posição. Foi obtido um valor para cada parâmetro por posição, sendo realizada previamente a média das 500 ondas obtidas por posição.

O conhecimento da influência da geometria da amostra na análise dos parâmetros da difusão é de extrema importância, conforme cita Ahn *et al.* (2018), uma vez que envolve tanto o efeito de borda desconhecido na difusão da onda quanto a determinação da solução analítica correta. Segundo Planès e Larose (2013) e Ahn *et al.* (2019), como os parâmetros da difusão são sensíveis às pequenas variações no material, a variabilidade e dispersões significativas das ondas ultrassônicas podem ser dependentes da geometria da amostra. No entanto, os autores não caracterizam essa influência nos parâmetros da difusão.

Schurr *et al.* (2011), em um estudo sobre as ondas *coda*, fizeram uma correlação entre o posicionamento dos transdutores e a distância até a borda. Os autores determinaram a distância de 15 cm dos transdutores até a borda do corpo de prova. O objetivo do distanciamento foi de garantir que as ondas difusas fossem atenuadas o suficiente no final da amostra. Segundo os autores, essa distância correspondeu a quinze vezes o caminho livre médio ( $l_e$ ), calculado de acordo com a Equação (20).

$$l_e = \frac{3D}{v_e} \quad (20)$$

Onde:

D é a difusividade, em m<sup>2</sup>/s, e  $v_e$  é a velocidade média na qual a energia é transportada, em m/s.

Ainda, In *et al.* (2013) relataram que, na análise da difusão ultrassônica, os transdutores foram afastados das bordas das amostras para limitar os efeitos das bordas. Porém, não especificaram o valor do distanciamento. Por sua vez, Aggelis e Shitoani (2008), apesar não apresentarem justificativa para o distanciamento, citaram que os transdutores foram posicionados a no mínimo 30 mm da borda.

Em análises da onda coerente, estudos que relacionam o distanciamento dos transdutores às laterais da amostra são difundidos. Autores como Naik, Malhotra e Popovics (2004) descrevem que na análise da VPU os transdutores devem estar posicionados a uma distância mínima das laterais da amostra maior que o comprimento de onda ultrassônica, evitando-se o fenômeno do efeito de borda.

Com base nos autores citados e, ainda, na falta de pesquisas que estudem diretamente as posições de leitura, presume-se a necessidade de verificar a influência do posicionamento dos transdutores nas análises de onda *coda*. Essa verificação tende a melhorar a qualidade das análises por ultrassom difuso, visando dar embasamento aos pesquisadores quanto a qual domínio utilizar em sua aproximação, ao distanciamento mínimo do transdutor a borda e a influência do posicionamento da leitura na amostra no todo.

### 3.3.2.2 Características dos transdutores

Outros fatores que influenciam nos parâmetros da difusão estão relacionados às características dos transdutores. Conforme citado ao longo do capítulo, a frequência dos transdutores utilizados na análise do ultrassom difuso varia entre 150 kHz e 1 MHz. Além disso, a determinação da frequência dentro desse limite deve garantir que o comprimento de onda seja da mesma escala de comprimento que os dispersores presentes no concreto. Assegurando, assim, a atenuação da onda coerente e o aparecimento da onda *coda*. Estudos realizados por Punurai *et al.* (2016), Becker, Jacobs e Qu (2003) e Ahn *et al.* (2019) comprovaram a dependência da difusividade e da dissipação com a frequência do transdutor. Nessas pesquisas, a difusividade diminuiu e a dissipação aumentou linearmente com o aumento da frequência.

A influência do transdutor também está relacionada à implementação de transdutores receptores pontuais (transdutores com diâmetro de 1 a 4 mm). Estudos recentes apresentados por Ahn *et al.* (2019) e Tinoco (2019) relataram que a detecção pontual é utilizada como forma de evitar que o campo ultrassônico difuso se auto cancele na superfície do transdutor-receptor, devido a uma área de contato ampla entre o transdutor e a superfície de concreto. Segundo os autores, para melhorar a repetibilidade das medições de ondas difusas, deve-se acoplar um tronco de cone de aço de dimensões menores que o diâmetro do transdutor na superfície do transdutor-receptor, caracterizando, assim, a transformação para transdutor pontual. Em uma comparação entre transdutores convencional e pontual, Tinoco (2019) constatou que a



utilização do receptor pontual apresenta menor dispersão nos resultados de difusividade, dissipação e ATME para diferentes espaçamentos entre os transdutores.

### *3.3.2.3 Pressão de acoplamento dos transdutores*

Em relação a pressão de acoplamento dos transdutores, Naik, Malhotra e Popovics (2004) citam que a precisão da medição da onda ultrassônica depende do acoplamento dos transdutores, devendo ser aplicada pressão de acoplamento suficiente. Estudos realizados por Camara (2017) comprovaram a influência da pressão de acoplamento nos parâmetros de tempo e frequência, porém não relacionaram com os parâmetros da difusão.

Diante disso, autores como Schikert e Krause (2010), Tinoco (2019) e Martins (2019) garantiram uma pressão de acoplamento constante durante a realização dos ensaios. Entretanto, não foram encontrados estudos na literatura científica sobre o comportamento dos parâmetros da difusão com a alteração na pressão de acoplamento.

### *3.3.2.4 Janela de Tempo e Banda de Frequência*

No que se refere à análise tempo-frequência, a escolha da largura da janela de tempo  $\Delta t$  e da largura da banda de frequência  $\Delta f$  exercem influência na densidade espectral de energia. O desvio padrão da densidade espectral de energia média pode ser reduzido aumentando  $\Delta t$  e/ou  $\Delta f$ , o que ocasionará uma perda de resolução no tempo ou na frequência (WEAVER, 1998).

No entanto, valores mais baixos de  $\Delta f$  resultam em valores mais exatos de difusividade e dissipação (integração na frequência realizada em uma região menor) e valores baixos de  $\Delta t$  proporcionam melhor ajuste no pico máximo de energia. Becker, Jacobs e Qu (2003) comprovaram a dependência expressiva da difusividade em relação a  $\Delta f$  e  $\Delta t$ , porém relataram que a dissipação se mostrou insensível a seleção desses parâmetros. Apesar da grande influência de  $\Delta f$  e  $\Delta t$  na análise tempo-frequência, não foram encontradas referências de critérios para escolha desses valores na literatura científica. Assim, espera-se que independente da escolha dos valores de  $\Delta f$  e  $\Delta t$ , caso eles sejam mantidos constantes, as variações nos parâmetros de difusão indicarão as mudanças no material e geometria.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As influências e pesquisas apresentadas ao longo desse capítulo são uma síntese dos estudos encontrados na literatura científica que se aproximam das variáveis que serão analisadas no presente trabalho.

Com base nesses estudos e na evolução do concreto como material, a fim de se obter um embasamento confiável para a aplicação do método na inspeção de estruturas, conclui ser necessário identificar o real comportamento do ultrassom difuso em relação a diferentes características do concreto e geometria das estruturas. Para isso, percebe-se a necessidade da análise da evolução dos parâmetros difusos no concreto com o tempo até idades mais avançadas. Ressalta-se que as pesquisas presentes na literatura verificaram as influências do material ao longo do tempo apenas nas idades iniciais, até o concreto obter resistência mecânica. No entanto, as alterações no concreto continuam a ocorrer nas idades mais avançadas, em escalas menores. Como a resistência à compressão é um ensaio difundido no meio acadêmico para a verificação da evolução do concreto no tempo, é relevante comparar a evolução dos parâmetros difusos com a resistência à compressão dos concretos.

Através da revisão bibliográfica também foi possível verificar a escassez de estudos que verifiquem a real influência das dimensões dos agregados graúdos comumente utilizados na nossa região nos parâmetros difusos. Atualmente na literatura científica há apenas estudos com materiais artificiais que visam verificar tais influências.

Ao considerar os fatores externos ao material, percebe-se a necessidade de estudos sobre o posicionamento das leituras ultrassônicas na amostra nas análises dos parâmetros difusos, com o objetivo de verificar possíveis variações espaciais dos parâmetros na amostra. Tanto na análise da influência do distanciamento do transdutor à borda quanto nas variações de posicionamento dos transdutores na amostra.

A ausência de estudos se estende na inexistência de uma faixa de valores dos parâmetros difusos a serem considerados para estruturas íntegras e, ainda, na comparação entre os resultados obtidos com diferentes formatos de corpo de prova. Pensando em uma aplicação prática de inspeção das estruturas, seria importante existir parâmetros de comparação de um concreto considerado íntegro para o concreto inspecionado. No entanto, na literatura científica não há estudos que determinam limites de variabilidade dos parâmetros difusos para concretos sem falhas.

Além de estudos que visam determinar tais limites, outra solução seria a concretagem de corpos de prova de menor dimensão junto as estruturas para a determinação dos parâmetros em estruturas sãs, para fins de comparação. Para que as comparações sejam válidas, se faz necessário verificar a influência da geometria da amostra nos parâmetros difusos, uma vez que não há estudos sobre o assunto na literatura científica.

Outro ponto que pode ser relevante quanto à geometria da amostra é a face de realização da leitura ultrassônica. Em geral, os ensaios ultrassônicos realizados para verificações dos parâmetros difusos são realizados em uma única face. Entretanto, sabe-se que as faces de um corpo de prova podem sofrer influência de adensamento. Assim, para fins de generalização dos resultados obtidos nas caracterizações dos elementos estruturais, se faz necessária a verificação da sensibilidade dos parâmetros difusos quanto à face de realização do ensaio.

Dentre diversas lacunas existentes na aplicação do método da difusão ultrassônica, a influência da escolha da solução analítica é uma delas. Como comprovado pela literatura científica apresentada, a determinação da equação utilizada na obtenção dos parâmetros difusos é intrínseca a cada autor. Apesar dos autores mais recentes seguirem os conceitos das primeiras pesquisas no assunto, não há análises que verifiquem qual a influência da solução analítica nos resultados dos parâmetros difusos. Ainda, não há estudos que determinem qual solução é a mais apropriada em cada caso.

Com as discussões supracitadas é possível concluir a falta de estudos sobre possíveis influências básicas no método da difusão ultrassônica, como as variações temporais e espaciais. A detecção ou não da influência dessas variáveis são de suma importância para garantir a correta interpretação dos resultados dos parâmetros difusos obtidos em ensaios de campo.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos de análises relacionadas ao método de ensaio para obtenção dos parâmetros difusos em um corpo de prova foram realizadas verificações relacionadas à geometria da amostra. Para os objetivos associados aos parâmetros difusos, as verificações foram realizadas considerando as influências do concreto como material de propagação da onda ultrassônica.

Assim, para atingir os objetivos relacionados à geometria da amostra e ao material, o programa experimental foi constituído de três etapas, sendo duas etapas preliminares e uma etapa principal. As análises dos resultados foram divididas em duas etapas principais: análises relacionadas à geometria da amostra e análises relacionadas ao material.

A primeira etapa preliminar do programa experimental foi realizada com o objetivo de determinar o número de ondas ultrassônicas necessárias para garantir confiabilidade estatística nos resultados obtidos, com intervalo de confiança de 90%. Foram verificados o número de repetições de acoplamento por posição e número de leituras a serem obtidas por acoplamento. O número de acoplamentos se refere ao número de vezes que os transdutores foram retirados e acoplados novamente na mesma posição. O número de leituras, por sua vez, se refere o número de ondas ultrassônicas captadas em cada acoplamento. As características de ensaio e seus resultados podem ser observados no APÊNDICE A.

Na segunda etapa preliminar foram obtidas as caracterizações dos materiais a serem utilizados, em específico, os agregados. Através desses resultados, definiu-se o traço utilizado na concretagem dos corpos de prova da etapa principal. Após concluídas as duas fases preliminares, deu-se início a etapa experimental principal.

A etapa principal do programa experimental consistiu na execução de ensaios de ultrassom por medição indireta e aplicação do método difuso em corpos de prova produzidos com concreto convencional, em idades que variaram de 1 a 135 dias, de acordo com características intrínsecas de cada lote. Os lotes foram nomeados de acordo com o formato do corpo de prova e ordem cronológica de concretagem.

Com isso, a etapa principal foi dividida em dois lotes, com nomeações de acordo com o formato do corpo de prova. Lotes que contemplaram corpos de prova em formato de placas foram nomeados como PL e em formato prismático, PR (duas letras iniciais de cada formato). O Lote PL ainda foi subdividido em PL-1 e PL-2, sendo PL-1 referente ao lote da primeira concretagem e PL-2, da segunda, uma vez que as concretagens ocorreram em dias e betonadas

distintos. O Lote PR foi subdividido em PR-1 e PR-2, sendo PR-1 o lote com traço semelhante ao utilizado nos lotes PL (brita 1 como agregado graúdo) e PR-2 o lote com traço composto por brita 0 como agregado graúdo.

Além dos ensaios ultrassônicos, na etapa principal foram realizados ensaios de resistência à compressão em idades específicas para cada lote, as quais variaram de 1 a 91 dias, e ensaios no estado fresco, avaliando a trabalhabilidade, massa específica e teor de ar incorporado.

No lote PL foram realizados ensaios em duas placas com dimensões 100 x 100 x 10 cm, concretadas com traços semelhantes, de mesma matriz cimentícia e brita 1, nomeadas PL-1 e PL-2. Com alguns dos resultados obtidos com o lote PL, foi possível otimizar os ensaios realizados no lote PR quanto a dimensão do corpo de prova e monitoramento ultrassônico.

No lote PR os ensaios ultrassônicos foram realizados em corpos de prova prismáticos, com dimensões de 40 x 10 x 10 cm, produzidos com dois concretos de mesma matriz e agregados graúdos de classificações granulométricas diferentes (brita 1 – PR-1 e brita 0 – PR-2). Ressalta-se que nesse lote foram produzidos três corpos de prova por tipo de mistura cimentícia, ou seja, por lote analisado.

Devido as paralizações ocasionadas pela COVID-19, houve atraso na execução dos ensaios do lote PR. Os ensaios que eram para ser realizados aos 28 dias foram realizadas aos 91 dias de idade. Assim, para atingir os objetivos propostos, foi necessário realizar leituras ultrassônicas na placa de concreto do lote PL-2 após os 28 dias, especificamente aos 135 dias.

Os ensaios foram realizados utilizando equipamentos do Grupo de Pesquisa e Ensaios Não-Destrutivos (GPEND), do Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) e do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), localizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), campus Florianópolis.

Com os ensaios de ultrassom realizados nos corpos de prova da etapa principal do programa experimental e processamento dos sinais pelo método da difusão, foi possível realizar as análises dos resultados, subdivida em: análises relacionadas ao material e à geometria da amostra. As análises foram realizadas por gráficos e análises estatísticas.

As análises relacionadas à geometria da amostra contemplaram: variabilidade dos parâmetros na placa de concreto para uma mesma idade com a verificação da influência da distância da borda, verificação da influência da face de realização da leitura ultrassônica nos prismas, comparação entre os diferentes formatos de corpo de prova (placa e prisma) e, por fim,

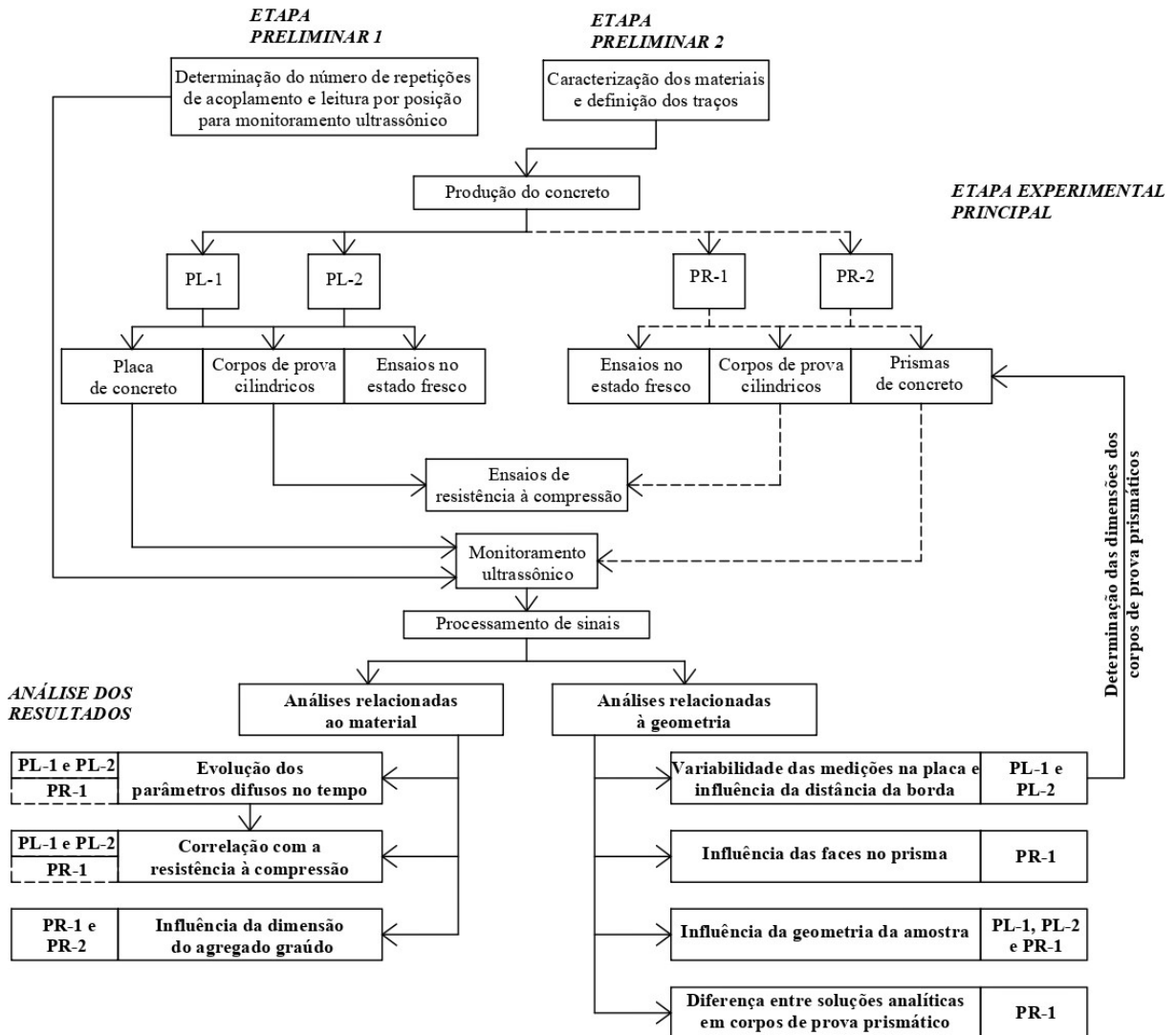
diferenças nos parâmetros em análises com diferentes soluções analíticas nos prismas de concreto.

As análises relacionadas ao material consistiram na verificação da influência do avanço da idade do concreto após o endurecimento nos parâmetros difusos (em ambos os formatos de corpo de prova), correlação dos parâmetros difusos influenciados pelo avanço da idade do concreto com a resistência à compressão e na verificação da influência da dimensão do agregado graúdo nos prismas de concreto.

Assim, com o monitoramento ultrassônico, processamento dos sinais e análises dos resultados foi possível atingir todos os objetivos da pesquisa. Na Figura 23 estão descritas as etapas do programa experimental.

As linhas e caixas tracejadas para o lote PR indicam que a produção dos corpos de prova e demais etapas foram realizadas após análises prévias do lote PL. A análise da influência da distância da borda verificada com os corpos de prova do lote PL auxiliou na determinação das dimensões dos corpos de prova prismáticos (lote PR). Os resultados prévios da análise no lote PL quanto as evoluções dos parâmetros difusos no tempo permitiram otimizar o monitoramento ultrassônico realizado no lote PR, no que se refere aos dias de realização do ensaio de ultrassom. As demais análises que englobam os lotes PL e PR foram realizadas simultaneamente, após a obtenção dos dados para ambos os lotes.

Figura 23 – Etapas do programa experimental.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Apesar do método da difusão ultrassônica resultar em quatro parâmetros (difusividade, dissipação, ATME e  $P_0$ ), na presente pesquisa foram estudados apenas os parâmetros da difusividade, dissipação e ATME. O parâmetro  $P_0$  não foi considerado nas análises uma vez que os resultados de  $P_0$  obtidos na literatura científica não apresentam valores e padrões de comportamento. Esse parâmetro depende da energia inicial depositada pela fonte, e com isso, aparenta ser sensível a 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, entre outros fatores (TINOCO, 2019). Dessa forma, não seria possível

descrever uma análise da real influência das variáveis analisadas na presente pesquisa no parâmetro  $P_0$ .

#### 4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

##### 4.1.1 Composição das misturas cimentícias

Todas as misturas cimentícias foram produzidas com Cimento de Alta Resistência Inicial, CP V-ARI, doados pela Supremo Secil Cimentos – Unidade São José/SC. O laudo técnico com as características do cimento está apresentado no ANEXO A.

Os agregados miúdos utilizados foram em proporções de areia natural e areia de britagem, em todas as misturas. Em relação ao agregado graúdo, no lote PL e no lote PR-1 foi utilizada a brita 1, enquanto no lote PR-2, foi utilizada a brita 0. Os agregados foram doados pela Supermix Concretos S/A. A caracterização desses agregados foi realizada seguindo as recomendações da ABNT NBR NM 248:2003 para o ensaio de granulometria, da NBR NM 53 (ABNT, 2009) para o ensaio de massa específica dos agregados graúdos e da NBR NM 52 (ABNT, 2009) para o ensaio de ensaios de massa específica dos agregados miúdos. Os resultados estão apresentados no APÊNDICE B. Ainda, antes da produção das misturas, os agregados foram secos em estufa e armazenados em recipientes isolados da umidade do ambiente. Assim, a umidade dos agregados foi adequada para evitar influências na produção e nas propriedades das misturas.

Aditivo superplastificante à base de policarboxilato, ADVA CAST 525, produzido pela GCP Applied Technologies foi adicionado. Assim como para o cimento, a caracterização do aditivo superplastificante foi baseada nos relatórios técnicos fornecidos pelo fabricante, apresentados no ANEXO B.

##### 4.1.2 Equipamento de Ultrassom

O equipamento de ultrassom utilizado na pesquisa foi o *Portable Ultrasonic non Destructive Digital Indicating Tester* – PUNDIT Lab, da marca PROCEQ, conforme apresentado na Figura 24, o qual está disponível no GPEND/UFSC.



Figura 24 – Aparelho de ultrassom Pundit Lab



Fonte: Proceq (2017).

A utilização desse equipamento permite a visualização e exportação dos dados do sinal ultrassônico de cada leitura por meio do *software* de análise Pundit Link, fornecido pelo mesmo fabricante do equipamento. O aparelho também permite o ajuste de parâmetros de uso como a amplitude da tensão de excitação (125, 250, 350 ou 500 V), ganho no sinal recebido (1x, 2x, 5x, 10x, 20x, 50x, 100x, 200x, 500x ou 1000x) e período de tempo de captura do sinal ultrassônico (0,5, 1, 2, 5 ou 10 ms).

Nos dados de saída, as amplitudes das ondas são mostradas como porcentagem da tensão de pulso utilizada. Já o ganho está relacionado com uma “amplificação” do formato de onda e deve ser escolhido de tal forma que os valores de amplitude estejam no intervalo entre 30 e 70% da voltagem aplicada, para evitar o truncamento do sinal (SILVA, 2017; SOUZA, 2017) ou a influência indesejada do ruído, o que impossibilita a aplicação da aproximação por difusão devido à perda de sensibilidade do sinal.

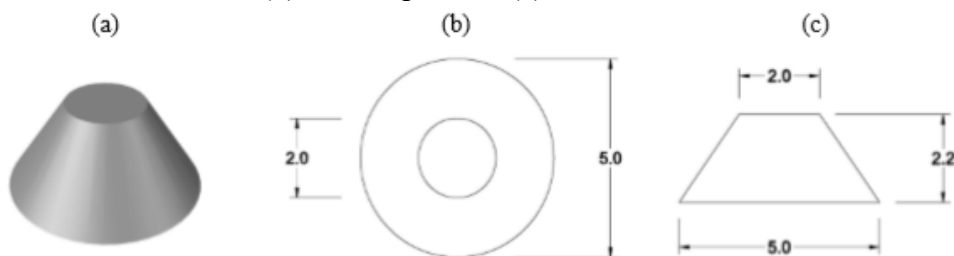
A frequência de amostragem,  $f_s$ , desse equipamento é de 2 MHz, com uma janela de tempo 0,5  $\mu$ s. O período de captura do sinal ultrassônico utilizado foi de 10 ms, sendo obtidos 20.000 pontos de aquisição.

Para promover uma maior dispersão da onda ultrassônica, dentre as possibilidades de transdutores disponíveis no GPEND/UFSC (54 kHz e 200 kHz), foram utilizados os transdutores de maior frequência, 200 kHz com diâmetro de 20 mm. Desta forma, o comprimento de onda para um concreto com VPU de 4000 m/s seria de 2,0 cm, da mesma ordem de grandeza dos agregados graúdos utilizados nas misturas com brita 1.

Na superfície do transdutor receptor foi posicionado um tronco de cone de aço, com o objetivo de reduzir a área de contato entre o transdutor e o concreto e evitar o cancelamento de fase das ondas recebidas (AHN et al., 2019). O tronco de cone utilizado foi o mesmo empregado

na pesquisa de Tinoco (2019), conforme as especificações apresentadas na Figura 25. Na Figura 26 é possível observar o tronco de cone posicionado no transdutor.

Figura 25 – Detalhamento do tronco de cone, com dimensões em milímetros: (a) perspectiva, (b) vista superior e (c) vista lateral.



Fonte: Tinoco (2019).

Figura 26 – Tronco de cone posicionado no transdutor.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

## 4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.2.1 Produção das misturas cimentícias

Visando dar continuidade às pesquisas realizadas recentemente no GPEND/UFSC e considerando que o comportamento para esse concreto nas primeiras idades já é conhecido pelo grupo de pesquisa, os traços das misturas cimentícias utilizadas nos lotes PL e PR desta pesquisa foram baseados na pesquisa realizada por Bressan (2019). Dentre os vários traços utilizados

pela autora, optou-se pelo traço de menor relação a/c, sendo essa igual a 0,4. A escolha considerou a atual necessidade da utilização de concretos com maior resistência, como os CAD.

Dessa forma, a matriz dos concretos utilizada na pesquisa foi produzida com relação a/c de 0,40, cimento CP V-ARI, agregado miúdo (areia de britagem e areia natural) e aditivo superplastificante. Ambos os lotes PL e o PR-1 foram produzidos com brita 1. O Lote PR-2 foi produzido com brita 0. Na Tabela 3 estão apresentados os traços utilizados nas respectivas concretagens dos corpos de prova, com consumo de cimento de 445 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 3 – Quadro resumo dos traços utilizados, em kg/m<sup>3</sup>.

<b>Lote</b>	<b>Cimento Portland</b>	<b>Areia de Britagem</b>	<b>Areia Natural</b>	<b>Brita 1</b>	<b>Brita 0</b>	<b>Água</b>	<b>Aditivo (% da massa de cimento)</b>
PL-1 e PL-2	445	577	243	987	-	178	0,37
PR-1	445	577	243	987	-	178	0,48
PR-2	445	577	243	-	1009	179	0,61

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Os traços utilizados possuíam teor de pasta de 32%, teor de argamassa de 55% e proporção dos agregados miúdos de 70% para a areia de britagem e 30% para a areia natural. Com relação à determinação da quantidade de aditivo, no primeiro lote de mistura, equivalente ao lote PL-1, foi utilizada a quantidade definida por Bressan (2019), sendo esta quantidade ajustada para atingir o mesmo abatimento nas demais misturas. Os abatimentos foram obtidos de acordo com a NBR NM 67: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 1998).

No lote PL, foram produzidas duas betonadas, utilizando brita 1 como agregado graúdo, contemplando ao todo duas placas (uma por betonada) e 30 corpos de prova cilíndricos para ensaio de resistência à compressão (15 por betonada). Na produção do PL-1, ao adicionar a quantidade de aditivo prescrita por Bressan (2019), o abatimento obtido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998) foi igual a 8 cm, estabelecendo este o valor referência para as demais produções. No lote PL-2 o abatimento de 8±1 cm foi obtido com a mesma quantidade de aditivo do lote PL-1.

As misturas do lote PL foram produzidas no LEE/UFSC, em uma betoneira intermitente de queda livre e eixo inclinado, com pás solidárias à cuba e capacidade ótima para uso de 135 litros de concreto (volume total de 350 litros).

O procedimento de produção seguiu a seguinte ordem de colocação dos materiais: inicialmente foi realizada a imprimação da betoneira, seguida pela colocação de toda a brita 1 e de aproximadamente 2/3 de toda a água; colocação dos agregados miúdos; colocação do cimento, acompanhado pelo restante da água; e, após homogeneização da mistura, adição do aditivo e mistura de cinco a seis minutos. Após o término do procedimento de mistura, para caracterização das misturas no estado fresco, além do ensaio de abatimento de tronco de cone realizado para verificar a consistência, foi realizado o ensaio de massa específica e teor de ar incorporado, conforme a NBR 9833 – Concreto Fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico (ABNT, 2008). O ensaio de massa específica e teor de incorporado foi realizado com a moldagem de corpo de prova cúbico, com lados de 30 cm.

No lote PR, foram produzidos, ao todo, seis corpos de prova prismáticos e 18 corpos de prova cilíndricos, sendo três CP's prismáticos e nove CP's cilíndricos do lote PR-1 (concreto com brita 1), e três CP's prismáticos e nove CP's cilíndricos do lote PR-2 (concreto com brita 0). Assim como no lote PL, após a produção dos concretos, foram realizados os ensaios de caracterização das misturas no estado fresco seguindo as normas NBR NM 67 (ABNT, 1998) e NBR 9833 (ABNT, 2008).

Para o lote PR, foi utilizada uma betoneira com capacidade de mistura de 90 litros e capacidade do tambor de 150 litros, seguindo o mesmo procedimento de produção do lote PL. Cada conjunto de prismas e corpos de prova cilíndrico foi produzido em uma única betonada. Como a betoneira utilizada no lote PR possuía capacidade menor que a betoneira utilizada no lote PL, e conseqüentemente, menor energia de mistura, para o lote PR-1, mantendo o traço inicial, foi necessário acrescentar maior quantidade de aditivo para atingir o mesmo abatimento ( $8 \pm 1$  cm).

A adaptação do traço do lote PR-1 para o concreto utilizado no lote PR-2, produzido com brita 0, foi realizado mantendo os teores de 32% de pasta e 55% de argamassa, alterando, apenas, a massa específica do agregado graúdo, uma vez que os demais materiais permaneceram os mesmos. Porém, como a granulometria da brita 0 é menor que a da brita 1, para um mesmo volume, a superfície de absorção da água de mistura é maior na brita 0, necessitando de mais aditivo para atingir o abatimento pré-determinado.

#### 4.2.2 Moldagem dos corpos de prova

O lote PL foi composto pela moldagem de duas placas de concreto de dimensões 100 x 100 x 10 cm, para realização do monitoramento ultrassônico, e trinta corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm, para realização do ensaio de resistência à compressão nas idades de 1, 2, 3, 7 e 28 dias.

A determinação das dimensões da placa de concreto foi realizada visando verificar a influência do distanciamento da borda do corpo de prova. Desta forma, optou-se por concretar uma placa com as maiores dimensões possíveis considerando a capacidade ótima da maior betoneira disponível no laboratório. Devido ao espaçamento dos transdutores e disposição das posições de leitura ultrassônica na placa, as dimensões laterais de 100 cm proporcionaram a verificação da influência do distanciamento da borda com variações de até 40 cm.

O molde da placa foi fabricado em compensado naval, revestido de isopor. Como o monitoramento ultrassônico foi realizado desde as primeiras idades, sem o desmolde da placa, para garantir que as ondas ultrassônicas fossem propagadas pelo concreto e não se dispersassem pelo molde, este foi isolado através de placas de isopor fixadas nas laterais e no fundo, conforme apresentado na Figura 27. As placas de isopor foram revestidas com filme plástico, evitando a perda de água da mistura para o isopor.

Figura 27 – Detalhes da forma das placas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O adensamento do concreto em ambas as categorias de corpo de prova (placa e cilíndricos) foi realizado mecanicamente com o auxílio de um vibrador de agulha, devido ao abatimento do concreto, seguindo as recomendações da NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2015). Na Figura 28 é possível observar a realização do adensamento da placa de concreto.

Figura 28 – Adensamento mecânico da placa de concreto.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Após o adensamento, a superfície superior das placas foi regularizada com o auxílio de uma régua metálica e alisada com uma colher de pedreiro, obtendo-se, assim, uma superfície suficientemente regular para a realização dos ensaios de ultrassom. As placas permaneceram em condição de laboratório, cobertas por lona plástica. Ressalta-se que a lona era retirada para a execução do ensaio de ultrassom.

Os corpos de prova cilíndricos permaneceram no mesmo ambiente que as placas nas primeiras 24 horas, sendo, posteriormente, desformados e levados para cura em câmara úmida, exceto os corpos de prova rompidos em 24 horas. Previamente a realização dos ensaios de compressão, os corpos de prova foram retificados na retífica disponível no LMCC/UFSC.

Com base nos resultados das placas, determinou-se que cada lote PR seria constituído de três corpos de prova prismáticos, para a realização do monitoramento ultrassônico, e nove corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm para realização do ensaio de resistência à compressão nas idades de 1, 7 e 91 dias, sendo rompidos três corpos de prova por idade.

Ressalta-se que a não realização dos ensaios aos 28 dias foi decorrente da pandemia da COVID-19, que ocasionou o fechamento dos laboratórios na UFSC.

Ao analisar os resultados obtidos no lote PL quanto a influência da distância da borda, foi constatado que os corpos de prova prismáticos poderiam ter dimensão mínima de 10 cm, respeitando a distância mínima da borda avaliada no lote PL de 5 cm. Como um dos objetivos na concretagem de corpos de prova prismáticos era a verificação da possibilidade de concretagem de amostras menores para serem utilizados como parâmetro de comparação de estruturas sãs, foi definido que os corpos de prova prismáticos possuiriam seção de 10 x 10 cm e comprimento de 40 cm.<sup>1</sup> O comprimento de 40 cm possibilitou a realização de três posições de leitura ultrassônica por face.

O adensamento de todos os corpos de prova foi realizado com o auxílio de um vibrador mecânico, seguindo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Os corpos de prova foram moldados em uma sala com temperatura controlada a 24°C, onde permaneceram por 24 horas protegidos por lona plástica. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados. Os cilíndricos, exceto os rompidos em 24 horas, foram levados para cura em câmara úmida. Previamente a realização dos ensaios de compressão, os corpos de prova foram retificados na retífica disponível no LMCC/UFSC. Entretanto, após a realização das leituras ultrassônicas nos corpos de prova prismáticos às 24 horas, estes foram armazenados no LEE/UFSC, sob condições de temperatura e umidade do laboratório, de maneira similar ao lote PL.

### **4.2.3 Ensaio de ultrassom**

No lote PL, os ensaios de ultrassom foram realizados no período de 1 a 28 dias em posições pré-determinadas de forma que abrangessem toda a área do corpo de prova analisado. No lote PL-1, especificamente, foram realizadas leituras nas idades de 1, 2, 3, 7 e 28 dias, enquanto no lote PL-2, nas idades de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 21, 28 e 135 dias.

---

<sup>1</sup> Corpos de prova com dimensões de 10 x 10 x 40 cm seguem as recomendações da NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2015), que determinam dimensões de corpos de prova prismáticos utilizados no ensaio prescrito pela NBR 12142 – Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos (ABNT, 2010).

O aumento no número de idades analisadas no lote PL-2 ocorreu com o intuito de verificar influências nas idades intermediárias, uma vez que os resultados obtidos para o Lote PL-1 indicaram possíveis diferenças entre as idades mais espaçadas para determinados parâmetros. Ainda, a análise aos 135 dias foi realizada com o intuito de obter referências de comportamento dos parâmetros difusos após os 28 dias.

As leituras ultrassônicas foram realizadas com os transdutores caracterizados no item 4.1.2, por transmissão indireta na face superior das placas (face regularizada), visando representar a realização do ensaio ultrassônico em estruturas reais, dentre as condições laboratoriais. Além da semelhança com a aplicação prática, a escolha pelo modo de transmissão indireto garante que o formato de onda recebido pelo transdutor receptor caracterize um processo predominantemente difuso, em que pouca energia coerente é recebida, dando continuidade aos estudos já realizados no grupo de pesquisa GPEND/UFSC por Tinoco (2019) e Martins (2019). O espaçamento entre os transdutores foi de 20 cm, conforme distância utilizada por Martins (2019) e comprovada como viável por Tinoco (2019). Vinte centímetros é uma distância considerada viável para monitoramentos em estruturas reais, uma vez que representa valor de aproximadamente dez vezes o tamanho do caminho livre.

O número de posições analisadas em cada idade foi definido baseando-se na Tabela 1 da NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018), em que determina a tolerância de tempo permitida para a realização do ensaio de resistência à compressão em função da idade de ensaio. Assim, foram realizadas leituras dentro da tolerância permitida para cada idade considerando o tempo de execução do ensaio de ultrassom, totalizando o número de posições apresentadas na Tabela 4. O número máximo de posições analisadas foi igual a vinte. Destaca-se que o número de posições estabelecido como máximo para a presente pesquisa é relatado na literatura científica no estudo realizado por Ahn et al. (2019).

Na Figura 29 estão apresentadas as posições em que as leituras foram realizadas. A numeração das posições segue a sequência em que elas foram analisadas com o decorrer da idade. Os posicionamentos foram definidos em razão do distanciamento da borda, iniciando em 5 cm em cada lateral e progredindo até 40 cm, com aumento gradativo de 5 e 10 cm. A disposição dos transdutores emissor e receptor foi pré-definida para cada posição analisada, sendo mantida para todas as idades.

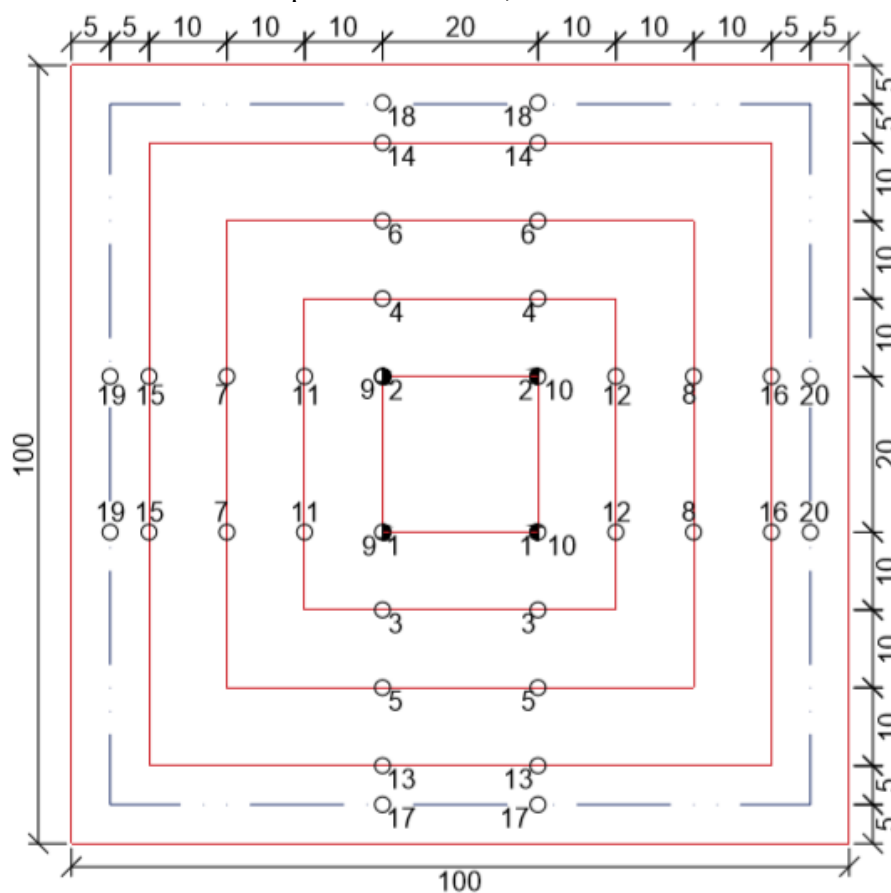


Tabela 4 – Número de posições monitoradas nas respectivas idades de análise, no lote PL.

Idade de ensaio (dias)	Número de posições monitoradas
1	4
2	8
3	12
4	12
5	12
6	12
7	20
14	20
21	20
28	20
135	20

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 29 – Determinação das posições de leituras ultrassônicas e dimensões dos corpos de prova do lote PL, em cm.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para minimizar possíveis efeitos indesejados de variáveis nas leituras ultrassônicas, os transdutores foram acoplados com pressão controlada e constante em todas as posições. Com base em Schurr et al. (2011), elaborou-se um acessório com mola, o qual aplica uma pressão constante nos transdutores. Dessa forma, foi utilizado um aparato móvel composto de uma placa de madeira com ganchos, dois suportes para transdutor com molas e pesos metálicos para garantir a estabilidade do aparato, conforme pode ser observado na Figura 30. No APÊNDICE C está apresentado o desenho esquemático e detalhado deste aparato.

Figura 30 – Aparato utilizado para controle de pressão durante ensaio no corpo de prova do lote PL



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Por ser móvel, o mesmo aparato foi utilizado em todas as posições, as quais foram demarcadas nos corpos de prova estudados com círculos do tamanho do orifício para encaixe do transdutor na placa de madeira do aparato, garantindo maior precisão no posicionamento em todas as idades. Em todas as leituras assegurou-se que possíveis variáveis do aparato não influenciassem nos resultados obtidos, dessa forma, utilizou-se sempre os mesmos suportes para cada transdutor (emissor e receptor), os quais foram acoplados na placa de madeira auxiliar sempre no mesmo orifício, com locação dos pesos nas mesmas posições.

O acoplamento entre os transdutores e os corpos de prova de concreto foi realizado por uma fina camada de vaselina sólida industrial. Antes do início dos ensaios ultrassônicos foi realizada a calibração do aparelho.

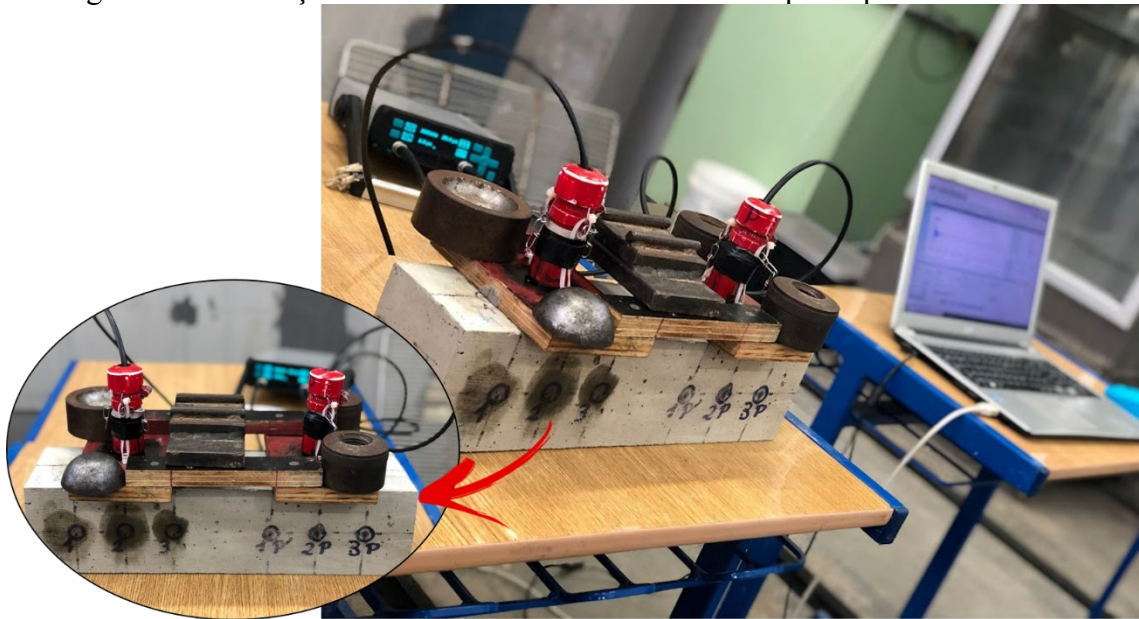
Com base nos resultados da etapa preliminar apresentada no APÊNDICE A, definiu-se que seriam realizadas sete repetições de acoplamento, com captação de dez ondas ultrassônicas por acoplamento, em uma mesma posição, para cada idade. Assim, com o mesmo posicionamento da placa de madeira do aparato de controle de pressão, os transdutores, juntamente com seus respectivos suportes, foram retirados e acoplados sete vezes, com a captação de dez ondas ultrassônicas por acoplamento, totalizando a obtenção e análise de setenta ondas por posição em cada idade.

A amplitude de excitação foi de 500 V, com ganhos variáveis em função da faixa de amplitude requerida em porcentagem. Os ganhos sofreram variações entre acoplamentos e posições analisadas devido ao comportamento aleatório das ondas ultrassônicas em materiais heterogêneos.

No lote PR, foi realizado o monitoramento ultrassônico em prismas de concreto nas idades de 1, 7 e 91 dias, em posições pré-determinadas. A determinação das idades para realização das leituras ultrassônicas foi baseada nos resultados obtidos no lote PL, visando idades mais espaçadas. A execução dos ensaios na idade de 91 dias e a falta de ensaios aos 28 dias foi ocasionada pela influência do isolamento social provocado pela COVID-19.

Todas as características de execução do ensaio de ultrassom citadas para o lote PL foram semelhantes no lote PR, com alterações apenas nas posições de leitura devido à geometria dos corpos de prova e ao número de posições analisadas por idade. Para melhor visualização da execução do ensaio no lote PR, na Figura 31 é possível observar a realização da leitura ultrassônica em uma das posições.

Figura 31 – Execução do ensaio de ultrassom em um corpo de prova do lote PR.

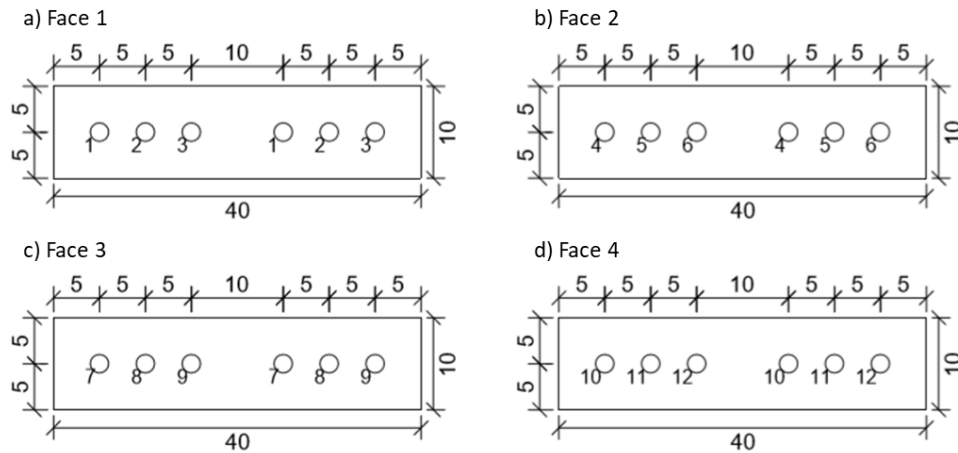


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Assim, no lote PR, foram realizadas leituras nas posições apresentadas na Figura 32. Na idade de 1 dia, foram realizadas leituras em três posições por corpo de prova, as quais se referem as posições do Lado/Face 1, totalizando nove leituras por lote. Nas idades de 7 e 91 dias, foram realizadas leituras ultrassônicas nas quatro faces dos prismas, em três posições por face, totalizando doze posições por corpo de prova, ou seja, trinta e seis posições por lote. Com isso, foi possível observar a influência da face nos resultados obtidos, uma vez que há diferença de adensamento e regularização da superfície nas faces dos prismas.

A determinação das posições foi baseada no distanciamento mínimo da borda ao centro do transdutor igual 5 cm em todas as direções, uma vez que esse foi o menor distanciamento da borda avaliado no lote PL, considerando o espaçamento entre os transdutores igual a 20 cm. Na Figura 32 estão determinadas as faces e posições de leitura, assim como a nomenclatura das posições utilizada para os corpos de prova do lote PR. A Face 1 corresponde a face de rasamento do corpo de prova, a Face 3 é a face oposta à Face 1 (fundo do molde) e as Faces 2 e 4, as faces laterais do molde do corpo de prova, opostas entre si.

Figura 32 – Determinação das posições de leituras ultrassônicas e dimensões dos corpos de prova do lote PR, em cm.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

#### 4.3 PROCESSAMENTO DE SINAIS ULTRASSÔNICOS

Após a obtenção das ondas ultrassônicas, tanto em relação ao lote PL quanto ao lote PR, foi realizado o processamento dos sinais pelo método da difusão por meio de rotinas no MATLAB. As rotinas foram desenvolvidas e validadas no GPEND/UFSC por Martins (2019) e Tinoco (2019). O processamento do sinal foi realizado individualmente para cada onda captada, ou seja, para cada uma das setenta ondas obtidas por posição, em cada corpo de prova e idade analisada. De modo geral, o processamento dos dados demorou em média oito horas para cada idade analisada, por corpo de prova e solução analítica.

Os parâmetros de dissipação e difusividade foram obtidos através da densidade espectral de energia obtida experimentalmente  $\langle \hat{E}(r,t,f) \rangle$  por meio do ajuste com a curva da solução analítica da equação da difusão  $\langle E(r,t,f) \rangle$ , em uma plotagem logarítmica, conforme descrito por Martins (2019) e Tinoco (2019). Assim, para se obter a densidade de energia espectral experimental  $\langle \hat{E}(r,t,f) \rangle$ , inicialmente foi realizada a normalização do sinal de amplitudes, seguida da análise Tempo-Frequência nos sinais ultrassônicos para uma certa frequência  $f$ , no ponto de medição  $r$ :

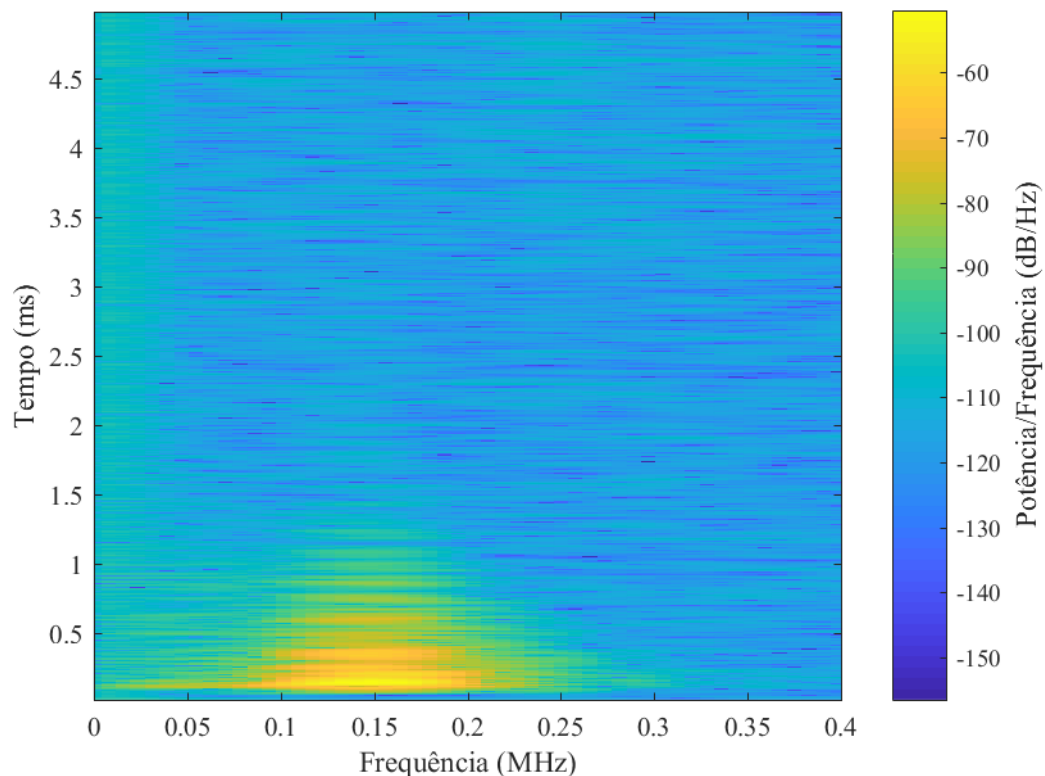
- (1) Dividiu-se o sinal normalizado no domínio do tempo em janelas de tempo de comprimento  $\Delta t$ , centradas em um tempo  $t_c$  e com 90% de superposição entre si;
- (2) Multiplicou-se o sinal de cada janela tempo pela janela de Hann, para suavizar as bordas do sinal;

(3) Calculou-se a transformada discreta de Fourier (DTFT, do inglês discrete-time Fourier transform) para cada janela de tempo e elevou-a ao quadrado, obtendo-se a densidade espectral de potência, denominada de espectrograma, visualizado na Figura 33. Todos os passos até aqui descritos foram feitos automaticamente pela função **spectrogram** do MATLAB.

(4) Integrou-se a densidade espectral de potência de cada janela de tempo em uma banda de frequência de largura  $\Delta f$  centrada em uma frequência  $f_c$ , obtendo-se a densidade de energia espectral experimental  $\langle \hat{E}(r,t,f) \rangle$  de cada ponto de tempo discreto, centrados em suas respectivas janelas de tempo.

O valor resultante, referente a densidade de energia espectral experimental  $\langle \hat{E}(r,t,f) \rangle$ , não é precisamente a densidade de energia ultrassônica  $\langle E(r,t,f) \rangle$ , uma vez que se difere desta por um fator relacionado à medição e ao processamento do sinal (MARTINS, 2019; TINOCO, 2019).

Figura 33 – Espectro de potência correspondente a uma das ondas ultrassônicas do Lote PL-2

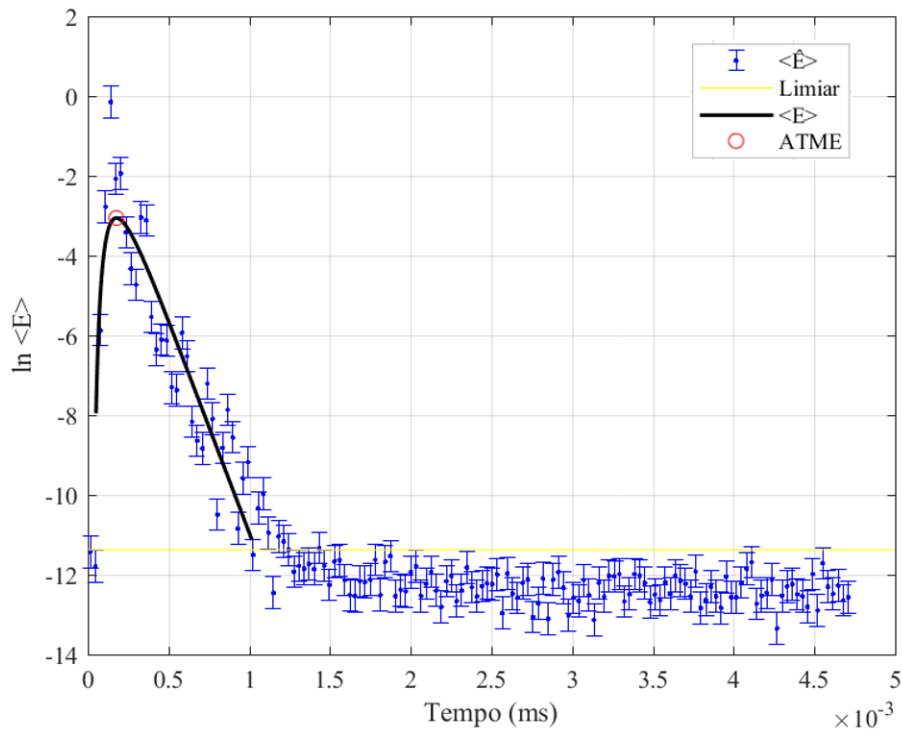


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Após a obtenção da densidade de energia espectral experimental  $\langle \hat{E}(r,t,f) \rangle$ , procedeu-se o ajuste entre as curvas analíticas e experimentais, exemplificado na Figura 34. O ajuste entre a densidade experimental e analítica é característico do domínio considerado na solução de

aproximação. Para a realização do ajuste, foram considerados somente os dados de energia acima do limiar do ruído, determinado a partir da densidade de energia espectral dos 20% finais da cauda da onda, onde havia somente a presença de ruído, como também pode ser observado na Figura 34. Apesar dos sinais terem sido captados com 10 ms de duração, foram utilizados apenas os primeiros 5 ms no processamento dos dados, uma vez que o último milissegundo desse período foi constituído somente de ruído em todas as ondas, sendo suficiente para determinação do limiar e dos parâmetros difusos. Ainda, a partir dessa curva, foi obtido intrinsecamente o ATME, como sendo o tempo de chegada da energia máxima.

Figura 34 - Aproximação da densidade de energia espectral experimental com a solução 2D infinita para uma das ondas ultrassônicas do Lote PL-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nesta pesquisa, foram utilizadas as soluções analíticas considerando os domínios 1D, bidimensional (2D) infinito e tridimensional (3D) infinito. As soluções analíticas 1D e 3D infinita foram utilizadas apenas para as ondas ultrassônicas captadas nos corpos de prova do lote PR-1, na verificação da influência da solução analítica em prismas.

As demais análises foram realizadas com a equação 2D infinita. A determinação dessa solução foi baseada nas definições para utilização de cada equação, nas pesquisas relatadas no item 3.1.1 e nas premissas de Deroo *et al.* (2010). Os corpos de prova analisados se aproximaram das dimensões utilizadas por Ramamoorthy, Kane e Turner (2004) no

monitoramento ultrassônico do lote PL e por Quiviger *et al.* (2013) e In *et al.* (2013) nos ensaios ultrassônicos do lote PR.

Segundo Deroo *et al.* (2010), a tendência de comportamento dos parâmetros difusos obtidos por equações finitas e infinitas são semelhantes. Porém, as soluções finitas apresentam barras de erros maiores, quando comparadas com as soluções infinitas. Diante disso, as soluções analíticas utilizadas foram do domínio infinito. Destaca-se que as conclusões foram obtidas por comparação entre os resultados alcançados nos experimentos da presente pesquisa e não por comparação com resultados externos, o que garante que ao utilizar a mesma solução analítica em todas as análises, as comparações foram válidas.

Por se tratar de domínio infinito, o ajuste foi realizado por um processo de regressão linear simples pelo método dos mínimos quadrados (BECKER; JACOBS; QU, 2003; DEROO *et al.*, 2010; AHN *et al.*, 2019; MARTINS, 2019; TINOCO, 2019).

Com o objetivo de dar continuidade aos trabalhos já realizados pelo grupo de pesquisa por Martins (2019) e Tinoco (2019), para a determinação da densidade espectral de energia experimental, os parâmetros de entrada adotados para todas as soluções analíticas foram:  $\Delta t = 32 \mu s$  (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).

Apesar da solução 2D infinita ser difundida no meio acadêmico para a análise de corpos de prova prismáticos, não há na literatura comparação entre os resultados dos parâmetros difusos obtidos por diferentes soluções analíticas. Assim, para atingir o objetivo de verificar a influência das soluções analíticas nos parâmetros difusos em corpos de prova prismáticos, além da solução 2D infinita, foi realizado o processamento do sinal com a equação 1D e 3D infinita para os corpos de prova do PR-1, conforme supracitado. A rotina no Matlab foi semelhante para todas as soluções analisadas, sofrendo alterações apenas nas equações relacionadas à solução analítica.

#### 4.4 PÓS-PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS PARÂMETROS DIFUSOS

Após o processamento dos dados, obtenção dos resultados da análise tempo-frequência e recuperação dos parâmetros da difusão (dissipação, difusividade e ATME), foram realizadas análises gráficas e estatísticas dos resultados.

Para evitar a retirada de dados significativos, a maioria das análises estatísticas foi realizada com todos os dados obtidos experimentalmente. Essa definição foi baseada em uma



análise prévia dos resultados, onde se constatou que dados espúrios em determinada leitura eram similares aos dados principais de outra leitura, com as mesmas características de captação da onda e processamento do sinal. Como a presente pesquisa visou analisar a onda difusa e a interação com as heterogeneidades do meio, a retirada de dados poderia influenciar na real análise do comportamento da onda no decorrer das repetições. No entanto, na análise com a solução analítica 1D foram observados dados espúrios incoerentes com o material analisado, como difusividade de aproximadamente 80 m<sup>2</sup>/s. Os resultados obtidos para todas os parâmetros com essas ondas foram retirados das análises posteriores.

As análises gráficas e estatísticas foram realizadas considerando os valores médios dos parâmetros por posição. Essa definição decorreu do ensaio prévio para determinação do número mínimo de repetições de leituras e acoplamento necessários para obter significância estatística para a média da posição e com base na pesquisa de Ahn et al. (2019), o qual de 500 repetições de ondas obteve apenas um valor para cada parâmetro por posição.

Dessa forma, com os dados dos parâmetros difusos obtidos para cada repetição de leitura, foram calculadas inicialmente as médias dos parâmetros de cada acoplamento. A média do acoplamento foi calculada com os dados das dez leituras realizadas em cada acoplamento.

A partir das médias dos acoplamentos, foram obtidas as médias das posições, para cada idade. Ou seja, a média de determinada posição em determinada idade foi obtida através das médias dos sete acoplamentos realizados para aquela posição e naquela idade, totalizando a média das 70 leituras.

Para exemplificar, na Tabela 5 estão representados os dados obtidos para a placa do lote PL-1, posição 1 e idade de um dia.

Tabela 5 – Dados parâmetros difusos na Posição 1 com um dia de idade, do lote PL-1.

		<b>Difusividade (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Dissipação (ms<sup>-1</sup>)</b>	<b>ATME (s)</b>
<b>ACOPLAMENTO 1</b>	Leitura 1	18,162	12,626	1,74E-04
	Leitura 2	15,764	15,067	1,74E-04
	Leitura 3	17,380	13,363	1,74E-04
	Leitura 4	18,287	12,597	1,74E-04
	Leitura 5	18,320	12,553	1,74E-04
	Leitura 6	19,785	12,260	1,67E-04
	Leitura 7	19,707	12,287	1,67E-04
	Leitura 8	19,818	12,210	1,67E-04
	Leitura 9	21,345	10,676	1,67E-04
	Leitura 10	19,759	12,244	1,67E-04
<b>MÉDIA Acoplamento 1</b>		<b>18,833</b>	<b>12,588</b>	<b>1,70E-04</b>
<b>ACOPLAMENTO 2</b>	Leitura 1	23,243	9,798	1,63E-04
	Leitura 2	23,421	9,711	1,63E-04
	Leitura 3	18,769	11,506	1,77E-04
	Leitura 4	17,360	13,411	1,74E-04

	Leitura 5	16,337	13,796	1,77E-04
	Leitura 6	23,063	9,803	1,67E-04
	Leitura 7	20,883	10,149	1,74E-04
	Leitura 8	22,558	9,995	1,67E-04
	Leitura 9	22,826	9,875	1,67E-04
	Leitura 10	20,012	11,275	1,70E-04
<b>MÉDIA Acoplamento 2</b>		<b>20,847</b>	<b>10,932</b>	<b>1,70E-04</b>
<b>ACOPLAMENTO 3</b>	Leitura 1	19,624	12,247	1,67E-04
	Leitura 2	19,574	12,280	1,67E-04
	Leitura 3	19,831	12,173	1,67E-04
	Leitura 4	24,305	9,853	1,60E-04
	Leitura 5	19,827	12,185	1,67E-04
	Leitura 6	19,699	12,212	1,67E-04
	Leitura 7	19,745	12,175	1,67E-04
	Leitura 8	19,864	12,084	1,67E-04
	Leitura 9	19,978	12,033	1,67E-04
	Leitura 10	24,683	9,704	1,60E-04
<b>MÉDIA Acoplamento 3</b>		<b>20,713</b>	<b>11,695</b>	<b>1,65E-04</b>
<b>ACOPLAMENTO 4</b>	Leitura 1	27,583	10,349	1,46E-04
	Leitura 2	27,980	10,233	1,46E-04
	Leitura 3	21,814	12,783	1,56E-04
	Leitura 4	27,528	10,388	1,46E-04
	Leitura 5	21,530	12,987	1,56E-04
	Leitura 6	28,136	10,213	1,46E-04
	Leitura 7	27,616	10,368	1,46E-04
	Leitura 8	24,997	10,444	1,53E-04
	Leitura 9	27,885	10,204	1,46E-04
	Leitura 10	25,151	10,419	1,53E-04
<b>MÉDIA Acoplamento 4</b>		<b>26,022</b>	<b>10,839</b>	<b>1,49E-04</b>
<b>ACOPLAMENTO 5</b>	Leitura 1	13,874	18,597	1,74E-04
	Leitura 2	13,871	18,600	1,74E-04
	Leitura 3	13,933	18,538	1,70E-04
	Leitura 4	13,861	18,577	1,74E-04
	Leitura 5	13,709	18,913	1,70E-04
	Leitura 6	13,877	18,586	1,74E-04
	Leitura 7	13,819	18,533	1,74E-04
	Leitura 8	13,819	18,606	1,74E-04
	Leitura 9	13,881	18,509	1,74E-04
	Leitura 10	13,732	18,671	1,74E-04
<b>MÉDIA Acoplamento 5</b>		<b>13,838</b>	<b>18,613</b>	<b>1,73E-04</b>
<b>ACOPLAMENTO 6</b>	Leitura 1	28,787	10,191	1,42E-04
	Leitura 2	28,977	10,153	1,42E-04
	Leitura 3	29,099	10,152	1,42E-04
	Leitura 4	28,479	10,293	1,42E-04
	Leitura 5	29,038	10,171	1,42E-04
	Leitura 6	25,996	10,280	1,53E-04
	Leitura 7	28,849	10,238	1,42E-04
	Leitura 8	29,086	10,136	1,42E-04
	Leitura 9	28,928	10,190	1,42E-04
	Leitura 10	29,158	10,170	1,42E-04
<b>MÉDIA Acoplamento 6</b>		<b>28,640</b>	<b>10,198</b>	<b>1,43E-04</b>
<b>ACOPLAMENTO 7</b>	Leitura 1	<b>10,198</b>	11,753	1,56E-04
	Leitura 2	22,322	11,697	1,56E-04
	Leitura 3	22,349	11,717	1,56E-04
	Leitura 4	22,515	11,628	1,56E-04
	Leitura 5	22,235	11,729	1,60E-04

	Leitura 6	22,285	11,707	1,56E-04
	Leitura 7	22,319	11,709	1,56E-04
	Leitura 8	22,311	11,704	1,56E-04
	Leitura 9	22,190	11,746	1,60E-04
	Leitura 10	22,319	11,706	1,56E-04
	<b>MÉDIA Acoplamento 7</b>	<b>22,312</b>	<b>11,710</b>	<b>1,57E-04</b>
	<b>MÉDIA Posição 1</b>	<b>21,601</b>	<b>12,368</b>	<b>0,000</b>
	<b>DESVIO PADRÃO Posição 1</b>	<b>4,811</b>	<b>2,859</b>	<b>0,000</b>
	<b>C.V. Posição 1</b>	<b>22,273</b>	<b>23,118</b>	<b>7,161</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A partir das médias das posições, foram realizadas análises de aderência à distribuição normal para todas as configurações de dados necessárias. Ou seja, foram realizados os testes de Normalidade de Anderson-Darlin e de Igualdade de Variâncias para cada parâmetro difuso, em cada análise de resultado. Os resultados das análises de aderência a normalidade e igualdade de variâncias estão apresentados no APÊNDICE D.

Apesar de nem todas as análises demonstrarem aderência à distribuição normal e igualdade das variâncias, para a determinação dos testes estatísticos posteriores foram levadas em consideração as observações de Triola (2013).

Segundo Triola (2013), na aplicação da ANOVA as exigências de normalidade e igualdade de variâncias não precisam ser rígidas, uma vez que a análise de variância só não é viável em distribuições fortemente não normais ou com diferenças nas variâncias populacionais superiores a nove vezes entre a maior e a menor. Assim, considerando a confiabilidade do teste ANOVA e o exposto pelo autor supracitado, foi determinada a realização de análises de variância (ANOVA) para todos os resultados discutidos, na comparação de três ou mais médias. Nos resultados de comparação de apenas duas médias, foi realizado o Teste T.

Ainda, nos casos em que o resultado da ANOVA evidenciou que a distribuição de pelo menos um dos grupos era diferente das demais, foi realizado o Teste de *Tukey* de Diferença Honestamente Significativa (HSD - *Honestly Significant Difference*). O Teste de *Tukey* é considerado um teste de comparação múltipla, onde as médias são comparadas duas a duas, verificando a igualdade entre os pares. Com isso, possibilitou-se a verificação da real relevância de cada fator analisado. Os testes foram realizados com auxílio do *Software Statistica*.

As análises estatísticas dos resultados do lote PL foram realizadas separadamente para cada placa. Apesar do traço do concreto ter sido semelhante e das condições laboratoriais possuírem o mesmo controle para ambos os lotes, a análise por placa proporcionou a verificação das influências externas intrínsecas a cada lote. Ainda, a análise individual garantiu a

compreensão correta do comportamento dos parâmetros difusos nos espaçamentos de idade analisados em cada placa.

Para as análises que envolveram os resultados obtidos com os corpos de prova prismáticos do lote PR, todas as análises foram realizadas apenas com os corpos de prova concretados com brita 1, referentes ao Lote PR-1. Os resultados obtidos no Lote PR-2 foram utilizados apenas na verificação da influência da dimensão do agregado graúdo. Como o DMC da brita 0 é inferior ao comprimento da onda ultrassônica utilizada na presente pesquisa, os parâmetros difusos poderiam não ser representativos do material, de acordo com a literatura científica. Assim, para as análises relacionadas à geometria da amostra e a evolução dos parâmetros difusos no tempo, foram considerados apenas os corpos de prova com brita 1 (DMC próximo ao comprimento de onda).

Os parâmetros difusos obtidos para os corpos de prova com brita 0 (lote PR-2) foram utilizados na verificação da influência da dimensão do agregado graúdo, comparando-os estatisticamente com os resultados obtidos com brita 1 (lote PR-1).

#### **4.4.1 Análises relacionadas à geometria da amostra**

As análises relacionadas à geometria da amostra foram realizadas com ambos os formatos de corpo de prova, placa e prisma, dependendo de cada fator avaliado, para atingir os objetivos propostos.

##### *4.4.1.1 Variabilidade das medições ultrassônicas na placa de concreto e verificação da influência da distância da borda*

A análise da variabilidade das medições ultrassônicas e verificação da influência da distância da borda foi realizada com os ensaios ultrassônicos realizados em ambos os lotes PL, ou seja, nas placas de concreto, nas idades de 7 e 28 dias.

A variabilidade foi analisada com base na representação gráfica dos resultados obtidos e nos coeficientes de variação dos parâmetros difusos. A verificação da influência da distância da borda foi realizada através da ANOVA e Teste de *Tukey*, por agrupamento dos dados com distâncias iguais. Ainda, os resultados de influência da distância da borda foram correlacionados com as respectivas médias de comprimento da onda, para cada idade e lote.

Os comprimentos de onda foram calculados a partir dos valores de velocidades das ondas obtidas automaticamente pelo aparelho de ultrassom. Com isso, foram coletadas as velocidades de todas as ondas e calculadas as velocidades médias por agrupamento de distância da borda.

#### *4.4.1.2 Influência da face nos prismas*

Para verificar a influência da face de realização dos ensaios ultrassônicos, considerando uma possível interferência do adensamento, foram realizadas análises com os dados obtidos nos ensaios ultrassônicos realizados nos prismas de concreto com brita 1, ou seja, lote PR-1. Foram comparados os resultados obtidos nas quatro faces dos corpos de prova prismáticos, com os dados obtidos nas idades de 7 e 91 dias, por meio de ANOVA.

#### *4.4.1.3 Influência da geometria da amostra*

Para verificação da influência da geometria da amostra, foram comparados os parâmetros difusos obtidos nas placas e primas de concreto nas idades de 7 dias e após 28 dias, englobando os dados de 135 dias para placa e 91 dias para prisma. As comparações foram realizadas com os dados obtidos na idade de 7 dias, com os corpos de prova dos lotes PL-1, PL-2 e PR-1; com os dados obtidos nas idades de 135 dias para os corpos de prova do lote PL-2 e 91 dias do lote PR-1. Apesar dos corpos de prova analisados após 28 dias serem de idades distintas, como as idades são consideradas avançadas na evolução do concreto, a idade não foi considerada como fator de influência nos resultados obtidos. Ainda, ao considerar os resultados obtidos na análise da influência da idade do concreto nos parâmetros difusos, pode-se concluir que após os 28 dias, a idade não influencia nos parâmetros, conforme apresentado no item 5.3.1 do presente trabalho.

Os resultados, agrupados nas idades de 7 dias e após 28 dias, foram comparados por meio de análise estatística. Como foram comparadas as médias de apenas dois formatos de corpo de prova, foram realizados Testes T para cada parâmetro, por idade.

#### *4.4.1.4 Avaliação da diferença entre soluções analíticas*

Para verificar se houve diferença na utilização de diferentes soluções analíticas, as ondas ultrassônicas obtidas nos corpos de prova prismáticos com brita 1, lote PR-1, nas idades

de 1, 7 e 91 dias, passaram pelo processamento dos sinais por três soluções analíticas distintas: 1D, 2D infinita e 3D infinita. Os resultados dos parâmetros difusos (difusividade, dissipação e ATME) obtidos pelas três soluções foram comparados por meio de gráficos e análises estatísticas. As análises estatísticas consistiram em ANOVA e Teste de *Tukey*.

#### **4.4.2 Análises relacionadas ao material**

As análises relacionadas ao material foram realizadas primeiramente com os parâmetros difusos obtidos nos corpos de prova do lote PL, ou seja, placas de concreto. As análises realizadas com os dados do lote PR-1 tiveram como objetivo confirmar os resultados obtidos para as placas.

Por fim, os dados do lote PR-2 foram comparados com os dados do lote PR-1 para verificação da influência da dimensão do agregado graúdo.

##### *4.4.2.1 Evolução dos parâmetros difusos no tempo*

Para verificar a influência da idade do concreto nos parâmetros difusos, primeiramente foram realizadas análises com os dados obtidos com placas de concreto, lotes PL-1 e PL-2.

As análises iniciaram pela verificação gráfica dos formatos de onda obtidos para cada idade. Após isso, foram realizadas análises individuais para cada parâmetro e lote. Os parâmetros foram analisados por gráficos “Parâmetro x Idade (dias)”. A abcissa foi plotada em escala logarítmica de tempo. Após discussões gráficas foram realizadas ANOVA para cada parâmetro e lote, seguido do Teste de *Tukey* para os resultados de ANOVA que apresentaram p-valor inferior ao nível de significância. Por fim, os parâmetros foram comparados através da representação gráfica da curva de densidade de energia espectral analítica com base nos parâmetros médios obtidos para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias dos lotes PL-1 e PL-2.

Finalizadas as análises para os dados dos corpos de prova prismáticos, foram analisados os parâmetros difusos obtidos para o lote PR-1, por gráficos “Parâmetro x Idade (dias)” seguido de ANOVA e Teste *Tukey*, semelhante ao lote PL.

##### *4.4.2.2 Correlação dos parâmetros difusos com a resistência à compressão*

A correlação dos parâmetros difusos com a resistência à compressão foi realizada apenas nos parâmetros difusos que apresentaram sensibilidade ao avanço da idade para ambos os

formatos de corpo de prova. Assim, foi realizada uma correlação por gráficos “Parâmetro difuso x Resistência à compressão” e plotado uma linha de tendência linear por gráfico.

#### *4.4.2.3 Verificação da influência da dimensão do agregado graúdo*

Para verificar a influência da dimensão do agregado graúdo nos parâmetros difusos, foram realizadas análises com os dados obtidos nos prismas de concreto concretados com britas de DMC distintos, referentes aos lotes PR-1 e PR-2.

Primeiramente, os parâmetros difusos foram analisados graficamente, em gráficos “Parâmetro x Idade (dias)”. Em cada gráfico foram plotados os resultados de cada lote, referente ao parâmetro analisado. Posteriormente foi realizada análise estatística, por Teste T.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Os resultados são referentes às caracterizações do concreto, ensaios de ultrassom e aplicação do método da difusão ultrassônica por meio do processamento de sinais ao longo do tempo.

A apresentação dos resultados será dividida em caracterização dos concretos utilizados, análises relacionadas à geometria da amostra e análises relacionadas ao material.

Para todas as análises, as concretagens dos corpos de prova foram divididas em lotes de acordo com o formato do corpo de prova, sendo PL para placas e PR para prismas. O lote PL consistiu na concretagem de duas placas de concreto, de traço semelhante, divididas em lote PL-1 e PL-2, de acordo com a ordem cronológica de concretagem.

No lote PR foram concretados três corpos de prova prismáticos em cada concretagem. O lote PR-1 possuiu traço semelhante ao dos lotes PL, sendo utilizada a brita 1 como agregado graúdo. O lote PR-2, por sua vez, possuiu brita 0 como agregado graúdo.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

A caracterização do concreto foi realizada por ensaios no estado fresco e endurecido. No estado fresco, compreenderam os ensaios de trabalhabilidade, massa específica e teor de ar incorporado; e no estado endurecido, o ensaio de resistência à compressão ao longo do tempo.

Com base no abatimento da primeira betonada, todas as misturas produzidas obtiveram abatimento de  $8 \pm 1$  cm. Na Tabela 6 estão apresentados os resultados dos demais ensaios realizados nos concretos no estado fresco.

Tabela 6 – Resultados obtidos para massa específica teórica, massa específica experimental e teor de ar incorporado.

Lote	Massa Específica Teórica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Experimental (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de Ar (%)
PL-1	2,4283	2,3729	2,28%
PL-2	2,4283	2,4115	0,69%
PR-1	2,4279	2,4058	0,91%
PR-2	2,4494	2,3723	3,15%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Conforme pode ser observado na Tabela 6, houve grande variabilidade nos resultados obtidos para a massa específica experimental e, conseqüentemente, para o teor de ar



incorporado entre as misturas realizadas. A maior diferença foi obtida na substituição de brita 1 para brita 0, no lote PR-2. A alteração no material e na quantidade de aditivo adicionada para atingir o abatimento determinado podem ter ocasionado maior incorporação de ar à mistura.

No estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à compressão no concreto nas idades de 1 a 91 dias, variando com as datas de execução do ensaio do ultrassom, conforme previamente citados. Na Tabela 7 estão apresentados os resultados obtidos para cada mistura nas idades analisadas. Os campos com ausência de dados representam a não realização de ensaio para a idade e mistura específica.

Tabela 7 – Resultados ensaio de resistência à compressão (MPa).

<b>Idade (dias)</b>	<b>PL-1</b>	<b>PL-2</b>	<b>PR-1</b>	<b>PR-2</b>
<b>1</b>	35,8	38,4	41,3	39,9
<b>2</b>	41,8	43,1	-	-
<b>3</b>	45,8	46,7	-	-
<b>7</b>	50,1	50,4	55,2	54,6
<b>28</b>	57,4	54,4	-	-
<b>91</b>	-	-	72,7	73,8

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Apesar de ser de conhecimento geral que o teor de ar incorporado impacta diretamente na resistência à compressão dos concretos, ao comparar o teor de ar e as resistências das misturas semelhantes analisadas na presente pesquisa, não há uma aparente influência do ar incorporado na resistência à compressão. Em idades avançadas, as resistências das misturas com maior incorporação de ar se sobressaíram àquelas com menor porcentagem nos lotes PL. Porém, na idade de 1 (um) dia, as maiores resistências foram obtidas para as misturas semelhantes com menor teor de ar incorporado.

## 5.2 ANÁLISES RELACIONADAS À GEOMETRIA DA AMOSTRA

As análises relacionadas à geometria da amostra consistiram em verificações em dois formatos de corpo de prova: placas e prismas. Com isso, foi verificada a influência da distância da borda e a variabilidade das medições ultrassônicas em placas de concreto (lotes PL), influência da face de realização de leitura no prisma de concreto (lote PR-1), influência do formato do corpo de prova considerando uma mesma equação de aproximação (lotes PL e PR-1) e diferenças nos parâmetros em análises com diferentes equações no prisma de concreto (lote

PR-1). Para isso, foram realizados ensaios em duas placas de concreto e três primas, com características descritas no item 4.2.2.

Nas placas de concreto, as leituras foram realizadas em até 20 posições, variando a quantidade de posições avaliadas por idade. Nos prismas, as análises foram realizadas em três posições por face, variando o número de faces avaliadas por idade. Em cada posição foram captadas 70 ondas ultrassônicas, divididas em sete acoplamentos com a realização de 10 leituras por acoplamento. A totalidade de ondas captadas passaram pelo processamento dos sinais, obtendo-se, assim, os parâmetros de difusividade, dissipação e ATME para cada uma delas. Por fim, foram obtidas as médias de cada parâmetro para cada posição, em cada idade analisada.

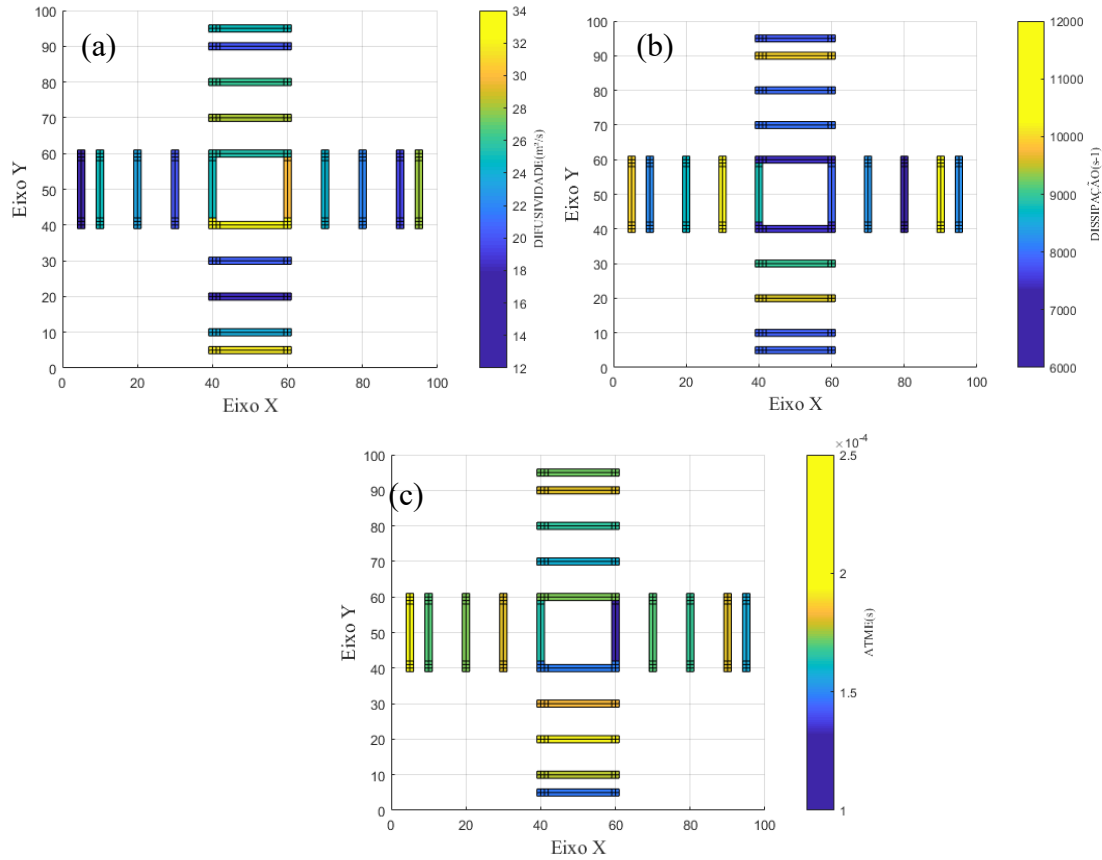
A apresentação dos resultados desta etapa iniciará pela variabilidade dos parâmetros na placa de concreto para uma mesma idade com a verificação da influência da distância da borda, seguindo para a verificação da influência da face de realização da leitura ultrassônica nos prismas, comparação entre os diferentes formatos de corpo de prova e, por fim, diferenças nos parâmetros em análises com diferentes equações nos prismas de concreto.

### **5.2.1 Variabilidade das medições ultrassônicas na placa de concreto e verificação da influência da distância da borda**

Para verificar a variabilidade das medições ultrassônicas na placa de concreto, primeiramente foram verificados os comportamentos dos parâmetros difusos em relação ao ponto de leitura na placa. Para isso, foram plotados gráficos de superfície com as respectivas médias de cada parâmetro nas posições em que foram realizadas as leituras. Na Figura 35 estão apresentadas as representações dos parâmetros difusos obtidos para o lote PL-1 aos 7 dias. As demais representações podem ser observadas no APÊNDICE E.

Através das representações gráficas dos parâmetros obtidos em cada posição, foi possível perceber a aleatoriedade dos valores em toda a placa. Apesar de algumas regiões apresentarem valores visivelmente diferentes de outras, esses valores não se repetiram de maneira padronizada em toda a placa quando analisada, por exemplo, a distância da borda. Ainda, os destaques de regiões com valores diferentes se alteraram com o avanço da idade, não seguindo uma tendência de diferença explícita para uma localização da placa em relação ao todo, para as idades apresentadas. As regiões destacadas por apresentarem valores diferentes do entorno não se repetiram para todos os parâmetros difusos analisados.

Figura 35 - Representação gráfica dos valores dos parâmetros difusos obtidos para o lote PL-1 aos 7 dias de idade, sendo (a) Difusividade ( $m^2/s$ ), (b) Dissipação ( $s^{-1}$ ) e (c) ATME (s).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Diante disso, foram realizadas análises estatísticas nas idades de sete e vinte e oito dias pela ANOVA e Teste de *Tukey*. Através dessas análises, pode ser verificado se estatisticamente os parâmetros difusos seguiram alguma tendência de diferenciação em relação ao aumento do distanciamento do ponto de leitura à extremidade do corpo de prova. Os dados foram agrupados considerando a distância do ponto de realização da leitura à extremidade do corpo de prova, conforme as posições locadas na Figura 29. Ou seja, as distâncias consideradas foram de 5, 10, 20, 30 e 40 cm (distância do centro do transdutor à borda). Assim, cada distância foi representada por quatro posições, considerando a média das setenta ondas obtidas em cada posição, em cada lote e idade analisada. As análises estatísticas foram realizadas separadamente para cada parâmetro, em cada lote e idade. Nas Tabela 8 a Tabela 19 estão apresentados os resultados da ANOVA respectivos para cada parâmetro, por lote e idade. Nas tabelas que apresentam resultados ANOVA, SQ significa soma de quadrados, gl, graus de liberdade e MQ, quadrados médios.

Tabela 8 - Resultado ANOVA para o parâmetro da difusividade, na análise da distância da borda, Lote PL-1, idade de 7 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	104,2285	4	26,05713	1,65762	0,211871	3,055568
Dentro dos grupos	235,7941	15	15,71961			
Total	340,0226	19				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 9 - Resultado ANOVA para o parâmetro da difusividade, na análise da distância da borda, Lote PL-1, idade de 28 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	34,54583	4	8,636457	0,609752	0,661914	3,055568
Dentro dos grupos	212,4582	15	14,16388			
Total	247,0041	19				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 10 - Resultado ANOVA para o parâmetro da difusividade, na análise da distância da borda, Lote PL-2, idade de 7 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	84,88809	4	21,22202	4,565686	0,013034	3,055568
Dentro dos grupos	69,72235	15	4,648157			
Total	154,6104	19				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 11 - Resultado ANOVA para o parâmetro da difusividade, na análise da distância da borda, Lote PL-2, idade de 28 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	90,78113	4	22,69528	2,062817	0,136773	3,055568
Dentro dos grupos	165,0312	15	11,00208			
Total	255,8123	19				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 12 - Resultado ANOVA para o parâmetro da dissipação, na análise da distância da borda, Lote PL-1, idade de 7 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3180640	4	795160,1	0,841101	0,520406	3,055568
Dentro dos grupos	14180693	15	945379,5			
Total	17361333	19				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 13 - Resultado ANOVA para o parâmetro da dissipação, na análise da distância da borda, Lote PL-1, idade de 28 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3091812	4	772953	1,011457	0,432535	3,055568
Dentro dos grupos	11462968	15	764197,9			
<b>Total</b>	<b>14554780</b>	<b>19</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 14 - Resultado ANOVA para o parâmetro da dissipação, na análise da distância da borda, Lote PL-2, idade de 7 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5396355	4	1349089	3,497888	0,03298	3,055568
Dentro dos grupos	5785300	15	385686,6			
<b>Total</b>	<b>11181654</b>	<b>19</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 15 - Resultado ANOVA para o parâmetro da dissipação, na análise da distância da borda, Lote PL-2, idade de 28 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4136737,379	4	1034184,345	1,02274084	0,427211791	3,055568276
Dentro dos grupos	15167835,84	15	1011189,056			
<b>Total</b>	<b>19304573</b>	<b>19</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 16 - Resultado ANOVA para o parâmetro ATME, na análise da distância da borda, Lote PL-1, idade de 7 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,28E-09	4	3,19E-10	1,53197	0,243247	3,055568
Dentro dos grupos	3,13E-09	15	2,08E-10			
<b>Total</b>	<b>4,4E-09</b>	<b>19</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 17 - Resultado ANOVA para o parâmetro ATME, na análise da distância da borda, Lote PL-1, idade de 28 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,52E-10	4	1,88E-10	0,978086	0,448632	3,055568
Dentro dos grupos	2,88E-09	15	1,92E-10			
<b>Total</b>	<b>3,63E-09</b>	<b>19</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 18 - Resultado ANOVA para o parâmetro ATME, na análise da distância da borda, Lote PL-2, idade de 7 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,71E-09	4	6,77E-10	5,559992	0,005982	3,055568
Dentro dos grupos	1,83E-09	15	1,22E-10			
Total	4,54E-09	19				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 19 - Resultado ANOVA para o parâmetro ATME, na análise da distância da borda, Lote PL-2, idade de 28 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,89E-09	4	4,74E-10	2,79401	0,064547	3,055568
Dentro dos grupos	2,54E-09	15	1,69E-10			
Total	4,44E-09	19				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Com base nos p-valores encontrados nas análises de variância, constata-se a igualdade dos parâmetros para a maioria das análises com diferentes distâncias da borda, uma vez que os p-valores foram superiores ao nível de significância para todos os parâmetros no Lote PL-1 em ambas as idades e Lote PL-2, na idade de 28 dias. A ANOVA detectou diferença estatística apenas nas análises para o Lote PL-2, idade de 7 dias.

Na Tabela 20 estão apresentadas as médias obtidas para cada parâmetro, por distância da borda e lote/idade. Também estão representados os resultados do Teste de *Tukey* para o Lote PL-2 / 7 dias, em análises individuais para cada parâmetro. As letras iguais dentro do mesmo parâmetro, no mesmo lote/idade representam médias que não apresentaram diferença estatística à 95% de confiabilidade pelo Teste de *Tukey* para as respectivas distâncias da borda.

Ao analisar os resultados do Teste de *Tukey*, foi possível constatar que apesar dos dados não apresentarem igualdade estatística para todas as distâncias na idade de 7 dias do Lote PL-2, esse fator não foi determinante para a variabilidade dos dados. A ordem alfabética das letras indica o decréscimo das médias representadas. Com isso, percebe-se a aleatoriedade dos dados em relação à distância da borda, uma vez que o afastamento da posição de leitura não implica em uma tendência de alterações padronizada. A distância do ponto de leitura à extremidade do corpo de prova seria considerada influente caso os testes estatísticos apresentassem crescimento e/ou decréscimo com o afastamento ou, ainda, igualdade apenas entre distâncias sequenciais.

Tabela 20 – Resultados da análise de influência da distância de borda nos parâmetros difusos dos Lotes PL-1 e PL-2, nas idades de 7 e 28 dias.

LOTE/IDADE	Distância da borda (cm)	Difusividade (m <sup>2</sup> /s)	Dissipação (ms <sup>-1</sup> )	ATME (s)
Lote PL-1 / 7 dias	5	25,561	8,507	1,68E-04
	10	22,102	9,090	1,76E-04
	20	22,465	8,406	1,75E-04
	30	23,323	8,876	1,73E-04
	40	28,214	7,937	1,54E-04
Lote PL-1 / 28 dias	5	24,487	8,636	1,71E-04
	10	22,450	8,423	1,79E-04
	20	24,186	7,914	1,76E-04
	30	24,360	8,614	1,71E-04
	40	26,586	7,660	1,61E-04
Lote PL-2 / 7 dias	5	18,458 ab	8,858 ab	1,99E-04 ab
	10	15,402 b	9,547 ab	2,15E-04 b
	20	20,583 a	8,892 ab	1,86E-04 a
	30	21,282 a	8,442 a	1,82E-04 a
	40	18,336 ab	9,886 b	1,92E-04 ab
Lote PL-2 / 28 dias	5	18,828	8,792	1,98E-04
	10	17,568	8,624	2,08E-04
	20	20,986	8,578	1,87E-04
	30	23,716	7,866	1,79E-04
	40	21,350	7,651	1,92E-04

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Diante disso, conclui-se que, para as características de concreto e de ensaio da presente pesquisa, a distância da borda ao ponto de medição, a partir de 5 cm, não influenciou os resultados obtidos pelos parâmetros difusos. Apesar de Planès e Larose (2013) e Ahn *et al.* (2019) citarem que a variabilidade e dispersões das ondas ultrassônicas podem ser dependentes da geometria da amostra, os resultados apresentados indicaram que as variações não foram ocasionadas por influência da borda.

Schurr *et al.* (2011) consideraram um distanciamento mínimo dos transdutores até a borda de 15 cm, a fim de garantir que as ondas difusas fossem atenuadas o suficiente até o final da amostra. Por outro lado, Aggelis e Shitoani (2008) adotaram distanciamento mínimo de 3 cm da borda. As pesquisas citadas possuem configurações de ensaio e características do concreto diferentes, assim como as frequências dos transdutores utilizados também divergiram. Estas diferenças influenciam diretamente no comprimento da onda ultrassônica, um dos fatores

determinantes para o posicionamento dos transdutores em relação a borda nas análises da onda coerente, conforme citam Naik, Malhotra e Popovics (2004). Diante disso, com o objetivo de determinar a não influência dos distanciamentos utilizados em relação ao comprimento da onda, foram estimados comprimentos aparentes médios das ondas ultrassônicas na presente pesquisa, para cada idade e lote. Como não foram realizados ensaios para obtenção do VPU, os comprimentos de onda foram estimados com os dados obtidos por medição indireta durante o monitoramento ultrassônico. Os resultados do comprimento de onda médio aparente e correspondência da distância da borda com comprimento de onda estão apresentados na Tabela 21, em análises individuais por lote e idade.

Tabela 21 – Comprimento aparente médio da onda e correspondência da distância da borda com o comprimento da onda, para os lotes PL nas idades de 7 e 28 dias.

Lote/Idade	Comprimento Aparente Médio da Onda (cm)	Distância da borda em Comprimento Aparente Médio de Onda				
		5	10	20	30	40
Lote PL-1/7 dias	1,8	2,82	5,64	11,27	16,91	22,55
Lote PL-1/28 dias	1,8	2,87	5,73	11,46	17,19	22,92
Lote PL-2/7 dias	1,7	3,00	6,00	12,01	18,01	24,02
Lote PL-2/28 dias	1,7	2,97	5,93	11,87	17,80	23,73

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O comprimento de onda médio aparente obtido foi de aproximadamente 1,7 cm. Com isso, pode ser constatado que o posicionamento dos transdutores a distâncias das bordas superiores a 2,8 vezes o comprimento da onda foram suficientes para a atenuação da onda ultrassônica até o final da amostra. A não influencia do posicionamento do transdutor em relação a borda na presente pesquisa pode ser justificada pois a distância até o final da amostra foi superior ao caminho livre médio.

Partindo da premissa que a variabilidade na peça de concreto ocorre de maneira aleatória, foram analisados os coeficientes de variação dos parâmetros difusos, obtidos nas análises para cada lote e idade. Na Tabela 22 estão apresentadas as médias, desvio padrões e coeficientes de variação para cada parâmetro, lote e idade.

Para o parâmetro da difusividade, os coeficientes de variação variaram de 8 a 17% para o Lote PL-1 e de 6 a 24% para o Lote PL-2, em uma mesma idade. Para a dissipação, no Lote PL-1, os coeficientes de variação variaram entre 6 e 14% e no Lote PL-2, de 5 a 14%, em uma mesma idade.



Por fim, o ATME foi o parâmetro que apresentou as menores variações. Para ambos os lotes, os coeficientes de variações foram de 4 a 9%, para os dados coletados em uma mesma idade.

Tabela 22 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos parâmetros difusos, por idade para os lotes PL.

Lote	Idade (dias)	Número de posições analisadas	Difusividade			Dissipação			ATME		
			Média (m <sup>2</sup> /s)	Desvio Padrão (m <sup>2</sup> /s)	CV (%)	Média (ms <sup>-1</sup> )	Desvio Padrão (ms <sup>-1</sup> )	CV (%)	Média (s)	Desvio Padrão (s)	CV (%)
PL-1	1	4	19,01	1,76	9,27	12,26	0,97	7,89	1,73E-04	1,02E-05	5,88
	2	8	22,20	1,80	8,09	9,43	0,63	6,67	1,73E-04	8,61E-06	4,97
	3	12	23,45	4,13	17,63	9,51	1,34	14,10	1,62E-04	1,57E-05	9,70
	7	20	24,33	4,23	17,39	8,56	0,96	11,16	1,69E-04	1,52E-05	9,00
	28	20	24,41	3,61	14,77	8,25	0,88	10,61	1,72E-04	1,38E-05	8,05
PL-2	1	4	17,11	2,77	16,17	12,73	1,86	14,62	1,81E-04	7,96E-06	4,40
	2	8	20,24	1,60	7,90	10,18	0,52	5,07	1,78E-04	6,25E-06	3,50
	3	12	20,71	1,41	6,79	9,67	0,82	8,50	1,79E-04	4,40E-06	2,46
	4	12	20,44	2,47	12,08	9,15	0,88	9,64	1,85E-04	8,73E-06	4,73
	5	12	20,56	2,20	10,68	9,02	0,72	8,00	1,85E-04	9,52E-06	5,14
	6	12	21,41	3,39	15,83	8,55	0,60	7,06	1,85E-04	1,34E-05	7,27
	7	20	18,81	2,85	15,16	9,12	0,77	8,41	1,94E-04	1,55E-05	7,95
	14	20	19,77	3,13	15,84	8,96	0,70	7,77	1,91E-04	1,47E-05	7,72
	21	20	19,58	3,59	18,35	8,77	0,99	11,31	1,94E-04	1,52E-05	7,84
	28	20	20,49	3,67	17,91	8,30	1,01	12,14	1,93E-04	1,53E-05	7,92
135	20	22,26	5,38	24,18	7,53	1,02	13,56	1,91E-04	1,76E-05	9,19	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Apesar do número de posições avaliadas em cada idade terem sido diferentes, aumentando com o avanço do tempo, as variações obtidas pelos parâmetros difusos não foram influenciadas pelo número de posições e/ou idade do concreto. Por exemplo, para o parâmetro da difusividade no Lote PL-2, a variabilidade obtida na idade de um dia, com análise em apenas quatro posições, foi próxima à variabilidade de 14 dias, com análise em 20 posições. Ainda, não houve uma tendência de comportamento explícita com o aumento do número de posições e/ou idade do concreto, uma vez que os coeficientes de variação variaram aleatoriamente entre as análises.

Comparado às variações de 4% a 12% obtidas por Ahn et al. (2019) para o parâmetro da difusividade em vinte posições diferentes, as variações da presente pesquisa podem ser

consideradas mais altas. Apesar de na presente pesquisa a dissipação apresentar menores variações em toda a placa de concreto comparada a difusividade, os valores ainda foram superiores aos apresentados por Ahn et al. (2019).

Comparando, ainda, as variações obtidas na presente pesquisa com as apresentadas por Martins (2019), observa-se que na análise de quatro posições, com 15 ondas ultrassônicas captadas em um único acoplamento por posição, os coeficientes de variação dos parâmetros difusos obtidos pelo autor foram inferiores aos da presente pesquisa.

Diante disso, foi possível constatar que a variabilidade dos parâmetros difusos pode estar relacionada às características intrínsecas de cada pesquisa, como as características do material e as configurações de ensaio. Com isso, não foi possível definir um limite de valores toleráveis para caracterizar uma estrutura sã.

Considerando uma aplicação prática do ultrassom difuso para detectar possíveis deteriorações em concretos nos moldes apresentados no presente trabalho, foi possível identificar que a posição dos transdutores não influenciou nos parâmetros obtidos (respeitando-se uma distância mínima da borda). Entretanto, deve-se dar atenção à alta variabilidade dos parâmetros em uma estrutura sã, independentemente do número de posições e/ou idade analisada.

### **5.2.2 Influência da face nos prismas**

Para verificar a influência da face de realização dos ensaios ultrassônicos, considerando uma possível interferência do adensamento, foram realizadas análises comparando os resultados obtidos nas quatro faces dos corpos de prova prismáticos, lote PR-1. As verificações foram realizadas com os dados obtidos nas idades de 7 e 91 dias, por ANOVA.

Na Tabela 23 estão apresentados os resultados de média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados obtidos para o parâmetro da difusividade para os dados das faces 1 a 4. Nas Tabela 24 e Tabela 25 estão apresentados os resultados das análises de variância para a difusividade, nas idades de 7 e 91 dias, respectivamente.

Tabela 23 – Resultados do parâmetro da difusividade por face, nas idades de 7 e 91 dias, para o lote PR-1.

		FACE 1	FACE 2	FACE 3	FACE 4
<b>DIA 7</b>	<b>MÉDIA (m<sup>2</sup>/s)</b>	22,08	21,56	21,70	21,19
	<b>DEVIO PADRÃO (m<sup>2</sup>/s)</b>	1,76	3,18	5,62	2,39
	<b>CV (%)</b>	7,98	14,73	25,89	11,30
<b>DIA 91</b>	<b>MÉDIA (m<sup>2</sup>/s)</b>	22,30	21,49	21,18	21,28
	<b>DEVIO PADRÃO (m<sup>2</sup>/s)</b>	2,40	2,52	3,88	2,24
	<b>CV (%)</b>	10,78	11,72	18,31	10,50

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 24 – Resultado ANOVA para o parâmetro da difusividade na análise da influência da face, idade de 7 dias, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	3,609352	3	1,203117	0,095361	0,962046	2,90112
<b>Dentro dos grupos</b>	403,7247	32	12,6164			
<b>Total</b>	407,334	35				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 25 - Resultado ANOVA para o parâmetro da difusividade na análise da influência da face, idade de 91 dias, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	6,936916	3	2,312305	0,287687	0,833929	2,90112
<b>Dentro dos grupos</b>	257,2027	32	8,037584			
<b>Total</b>	264,1396	35				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na Tabela 26 estão apresentadas as médias, desvio padrão e coeficientes de variação dos resultados obtidos para o parâmetro da dissipação para os dados das faces 1 a 4. Nas Tabela 27 e Tabela 28 estão apresentados os resultados da ANOVA para a dissipação, nas idades de 7 e 91 dias, respectivamente.

Tabela 26 - Resultados do parâmetro da dissipação por face, nas idades de 7 e 91 dias, para o lote PR-1.

		FACE 1	FACE 2	FACE 3	FACE 4
<b>DIA 7</b>	<b>MÉDIA (ms<sup>-1</sup>)</b>	6,61	6,34	6,67	7,10
	<b>DEVIO PADRÃO (ms<sup>-1</sup>)</b>	0,88	0,63	1,09	0,87
	<b>CV (%)</b>	13,36	9,91	16,39	12,19
<b>DIA 91</b>	<b>MÉDIA (ms<sup>-1</sup>)</b>	5,21	5,25	5,39	5,59
	<b>DEVIO PADRÃO (ms<sup>-1</sup>)</b>	0,38	0,31	0,60	0,40
	<b>CV (%)</b>	7,32	5,96	11,20	7,15

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 27 - Resultado ANOVA para o parâmetro da dissipação na análise da influência da face, idade de 7 dias, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2700194	3	900064,6	1,154681	0,342202	2,90112
Dentro dos grupos	24943752	32	779492,3			
Total	27643946	35				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 28 - Resultado ANOVA para o parâmetro da dissipação na análise da influência da face, idade de 91 dias, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	778345,2	3	259448,4	1,351762	0,275116	2,90112
Dentro dos grupos	6141870	32	191933,5			
Total	6920216	35				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na Tabela 29 estão apresentadas as médias, desvio padrão e coeficientes de variação dos resultados obtidos para o ATME, para as faces 1 a 4. Nas Tabela 30 e Tabela 31 estão apresentados os resultados da ANOVA para o ATME, nas idades de 7 e 91 dias, respectivamente.

Tabela 29 - Resultados do parâmetro ATME por face, nas idades de 7 e 91 dias, para o lote PR-1.

		FACE 1	FACE 2	FACE 3	FACE 4
DIA 7	MÉDIA (s)	2,0E-04	2,1E-04	2,1E-04	2,0E-04
	DEVIO PADRÃO (s)	1,3E-05	2,1E-05	2,4E-05	1,5E-05
	CV (%)	6,55	10,14	11,72	7,29
DIA 91	MÉDIA (s)	2,1E-04	2,2E-04	2,2E-04	2,2E-04
	DEVIO PADRÃO (s)	1,5E-05	1,5E-05	2,4E-05	1,7E-05
	CV (%)	7,04	6,98	10,82	7,85

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 30 - Resultado ANOVA para o ATME na análise da influência da face, idade de 7 dias, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,21E-10	3	1,4E-10	0,402522	0,752149137	2,90112
Dentro dos grupos	1,12E-08	32	3,49E-10			
Total	1,16E-08	35				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 31 - Resultado ANOVA para o ATME na análise da influência da face, idade de 91 dias, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,11E-10	3	1,04E-10	0,312023	0,816530211	2,90112
Dentro dos grupos	1,06E-08	32	3,33E-10			
<b>Total</b>	<b>1,1E-08</b>	<b>35</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Com base nos resultados obtidos nas análises de variância, a face de leitura não influenciou em nenhum parâmetro da difusão ultrassônica. Para a difusividade, dissipação e ATME, nas idades de 7 e 91 dias, os p-valores foram superiores ao nível de significância (0,05). Com isso, foi possível constatar que, para as características de ensaio da presente pesquisa, os parâmetros difusos não foram influenciados pela face do corpo de prova.

A hipótese de influência da face nos parâmetros difusos seria proveniente de diferenças de adensamento da amostra no corpo de prova, o qual poderia ocasionar falhas na concretagem. No entanto, como não foi constatada influência, foi possível verificar que pequenas variações de adensamento nos corpos de prova prismáticos não influenciaram nos parâmetros difusos, considerando as características da presente pesquisa.

Ao considerar aplicações práticas, a não influência da face nos parâmetros difusos facilita a inspeção em estruturas. Leituras realizadas na face mais favorável para a realização do ensaio de ultrassom poderão caracterizar a estrutura como um todo, no que tange os parâmetros difusos. Ainda, considerando os cenários de pesquisas laboratoriais, a forma de realização dos ensaios em uma única face, como já difundido no meio acadêmico nas pesquisas realizadas por Ahn et al. (2019), Quiviger et al. (2012), Tinoco (2019), Tinoco e Pinto (2021), por exemplo, atestam resultados coerentes sobre a análise da estrutura.

### 5.2.3 Influência da geometria da amostra

Para verificar se o formato do corpo de prova influenciou nos parâmetros difusos, ao considerar a mesma solução analítica, foi realizada análise de comparação de médias pelo Teste T. As verificações foram realizadas com os dados obtidos para as placas (PL-1 e PL-2) e prismas (PR-1) nas idades de 7 dias e após 28 dias, englobando os dados de 135 dias para placa e 91 dias para prisma. Na Tabela 32 estão apresentados os resultados de média, desvio padrão e coeficiente de variação para cada parâmetro, geometria e idade. Ainda, estão apresentados os resultados de P-valores obtidos para cada análise.

Tabela 32 – Resultados de influência da geometria da amostra.

IDADE	Difusividade (m <sup>2</sup> /s)		Dissipação (ms <sup>-1</sup> )		ATME (s)		
	PLACA	PRISMA	PLACA	PRISMA	PLACA	PRISMA	
7 dias	Média	21,57	21,63	8,84	6,68	1,82E-04	2,02E-04
	Desvio Padrão	4,53	3,41	0,90	0,89	1,98E-05	1,82E-05
	C.V. (%)	20,99	15,77	10,19	13,30	10,89	8,99
	P-valor Teste T	0,49		<0,01		<0,01	
Após 28 dias	Média	22,26	21,56	7,53	5,36	1,91E-04	2,18E-04
	Desvio Padrão	5,38	2,75	1,02	0,44	1,76E-05	1,77E-05
	C.V. (%)	24,18	12,74	13,56	8,30	9,19	8,11
	P-valor Teste T	0,30		<0,01		<0,01	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Ao verificar os resultados de igualdade das médias para o parâmetro da difusividade, foi possível identificar que para ambos os conjuntos de idades analisados, a geometria da amostra não influenciou os dados obtidos para a difusividade, uma vez que os p-valores foram maiores que o nível de significância (0,05).

Para os parâmetros da dissipação e ATME foi constatada a influência da geometria do corpo de prova, independentemente da idade do concreto, uma vez que para ambas as análises com esses parâmetros, os p-valores encontrados foram inferiores a 0,05. Nos prismas, as médias de dissipação foram inferiores à placa, em ambos os conjuntos de idade analisados. O ATME apresentou comportamento inverso, sendo a média inferior na placa em comparação com o prisma.

Diante disso, pode-se considerar, de forma geral, que a geometria do corpo de prova influenciou nos resultados dos parâmetros difusos. O fato da geometria da amostra influenciar os parâmetros inviabiliza a comparação de resultados de diferentes dimensões de amostras, nos parâmetros da dissipação e ATME. Com isso, foi possível constatar que é inviável a concretagem de corpos de prova de tamanho reduzido para serem utilizados como amostras de comparação de material íntegro nas inspeções de estruturas, considerando análises com esses parâmetros difusos. Ressalta-se que essas conclusões foram obtidas para as características de ensaio e análise da presente pesquisa, havendo necessidade de novos estudos para abrangência da premissa.

Em relação à variabilidade dos parâmetros difusos na peça, não foi possível constatar influência da geometria e dimensões do corpo de prova. Ao comparar os coeficientes de variação encontrados para ambos os formatos de corpo de prova analisados, era esperado que o corpo de prova com maiores dimensões (placa) apresentasse maiores coeficientes de variação.

Quanto maior a estrutura, maior é a probabilidade de haver diferenças internas no material. No entanto, os coeficientes de variação não seguiram uma tendência de comportamento entre os corpos de prova, alternado com a idade e corpo de prova. Com isso, foi possível constatar que a variabilidade dos parâmetros difusos em uma amostra não está relacionada às suas dimensões, considerando as características intrínsecas a presente pesquisa.

#### **5.2.4 Avaliação da diferença entre soluções analíticas**

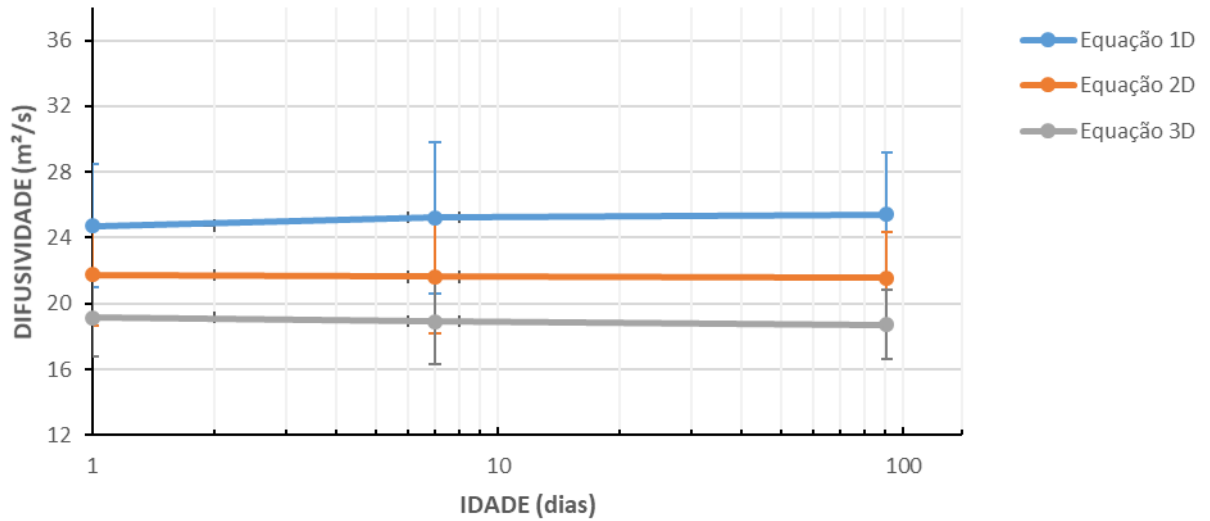
Com o objetivo de verificar se há diferença na utilização de diferentes soluções analíticas para corpos de prova prismáticos, a totalidade das ondas captadas nos prismas, lote PR-1, nas idades de 1, 7 e 91 dias passaram pelo processamento dos sinais por três soluções analíticas distintas: 1D, 2D infinita e 3D infinita. Com isso, foram obtidos os parâmetros de difusividade, dissipação e ATME para cada onda, pelas três soluções supracitadas.

Após a obtenção da média dos parâmetros para cada posição e idade, os resultados obtidos para os prismas pelas equações 1D, 2D infinita e 3D infinita foram comparados por meio de gráficos e análises estatísticas.

##### *5.2.4.1 Difusividade ultrassônica*

O primeiro parâmetro difuso apresentado é a difusividade ultrassônica ou coeficiente de difusão,  $D$  ( $m^2/s$ ). Na Figura 36, é possível observar os resultados médios obtidos pelas três equações supracitadas para as idades de 1, 7 e 91 dias. As barras apresentadas nos gráficos representam o desvio padrão das médias em cada idade e solução. A abcissa está em escala logarítmica de tempo.

Figura 36 – Resultados do parâmetro da difusividade na comparação das soluções analíticas 1D, 2D e 3D.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Analisando a Figura 36, pode ser constatada a diferença entre os resultados obtidos pelas três soluções analíticas. Ainda, a diferença se manteve constante ao longo do avanço da idade do concreto. Para confirmar tal premissa, na Tabela 33 a Tabela 35 estão apresentados os resultados de ANOVA realizados para comparação das médias das equações 1D, 2D infinita e 3D infinita para as idades de 1, 7 e 91 dias, respectivamente.

Tabela 33 – Resultado ANOVA para difusividade, na comparação de soluções analíticas, idade de 1 dia, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	139,868004	2	69,934002	7,082857	0,003823	3,402826
Dentro dos grupos	236,9687859	24	9,87369941			
<b>Total</b>	<b>376,8367899</b>	<b>26</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 34 - Resultado ANOVA para difusividade, na comparação de soluções analíticas, idade de 7 dias, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	721,7482	2	360,8741	27,3225858	2,8E-10	3,082852
Dentro dos grupos	1386,83	105	13,2079			
<b>Total</b>	<b>2108,578</b>	<b>107</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).



Tabela 35 - Resultado ANOVA para difusividade, na comparação de soluções analíticas, idade de 91 dias, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	807,4634	2	403,7317	46,4602784	3,52E-15	3,082852
Dentro dos grupos	912,4317	105	8,689825			
<b>Total</b>	<b>1719,895</b>	<b>107</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Confirmando o pressuposto de diferença entre as soluções observado graficamente, para o parâmetro da difusividade ultrassônica, em todas as idades analisadas, pelo menos uma das soluções analíticas se mostrou diferente das demais, uma vez que em todas as análises os p-valores foram inferiores ao nível de significância (0,05). Para verificar quais soluções foram estatisticamente diferentes entre si, na Tabela 36 estão apresentados os resultados obtidos pelo Teste de *Tukey*. Ressalta-se que o teste foi realizado separadamente por idade. Com isso, as letras iguais, apenas dentro da mesma idade, representam médias que não apresentaram diferença estatística à 95% de confiabilidade pelo Teste de *Tukey* para as respectivas soluções analíticas.

Tabela 36 - Resultado Teste de *Tukey* para difusividade, em m<sup>2</sup>/s, na comparação de soluções analíticas, para o lote PR-1.

Equação	IDADE		
	1 dia	7 dias	91 dias
<b>1D</b>	24,72 a	25,22 a	25,40 a
<b>2D</b>	21,76 ab	21,63 b	21,56 b
<b>3D</b>	19,15 b	18,91 c	18,73 c

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

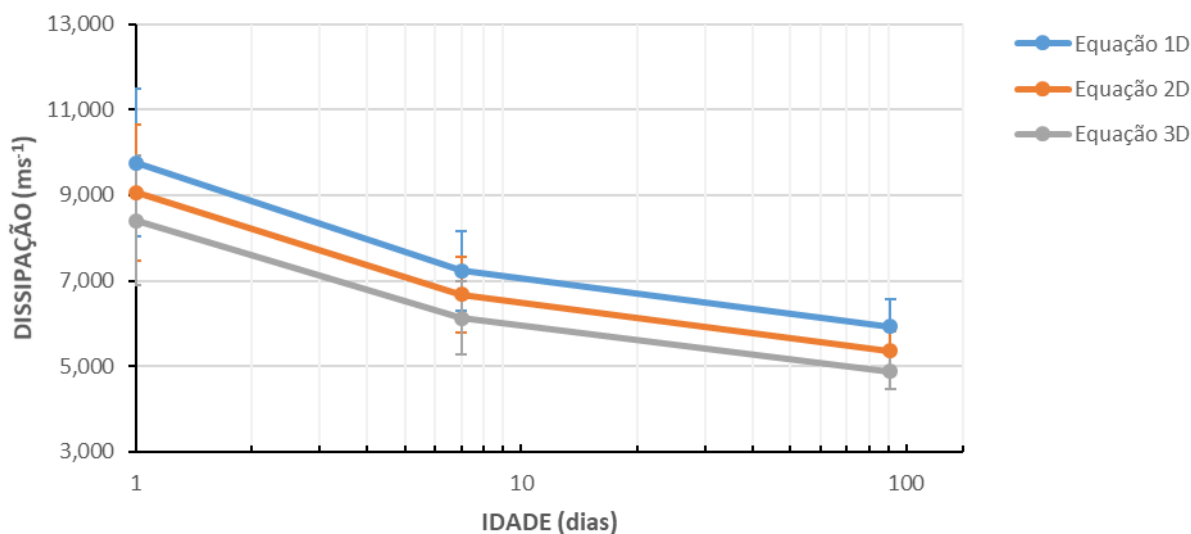
Ao verificar os resultados do Teste de *Tukey*, pode ser constatado que na idade de 1 dia, houve diferença estatística apenas entre as soluções analíticas 1D e 3D infinita. No entanto, com o aumento da idade do concreto, as diferenças foram obtidas entre todas as soluções analisadas.

Tanto na análise gráfica quanto estatisticamente, foi possível constatar que a difusividade diminuiu com o aumento do número de direções consideradas na análise. Ou seja, com a solução analítica 1D, na qual é considerado que apenas uma dimensão influencie na análise, os valores de difusividade foram superiores aos obtidos com a solução analítica 3D, considerando influência das três dimensões.

### 5.2.4.2 Dissipação

Para analisar a influência da solução analítica no parâmetro da dissipação,  $\sigma$  ( $s^{-1}$ ), na Figura 37, é possível observar os resultados médios obtidos pelas três equações supracitadas para as idades de 1, 7 e 91 dias. As barras apresentadas nos gráficos representam o desvio padrão das médias em cada idade e solução. A abcissa está em escala logarítmica de tempo.

Figura 37 - Resultados do parâmetros da dissipação na comparação das soluções analíticas 1D, 2D e 3D, para o lote PR-1.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Assim como para o parâmetro da difusividade, foi possível constatar graficamente a diferença entre as médias dos resultados da dissipação pelas três soluções analíticas analisadas. Ainda, a semelhança do comportamento dos dados da dissipação com o parâmetro da difusividade foi observada na diminuição dos valores da Equação 1D para a Equação 2D e 3D.

Na Tabela 37, Tabela 38 e Tabela 39 estão apresentados os resultados de ANOVA realizados para comparação das médias das equações 1D, 2D infinita e 3D infinita para as idades de 1, 7 e 91 dias para o parâmetro da dissipação, respectivamente.

Tabela 37 - Resultado ANOVA para dissipação, na comparação de soluções analíticas, idade de 1 dia, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8130527	2	4065263	1,568028	0,229073	3,402826
Dentro dos grupos	62222293	24	2592596			
<b>Total</b>	<b>70352820</b>	<b>26</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 38 - Resultado ANOVA para dissipação, na comparação de soluções analíticas, idade de 7 dias, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	22277409	2	11138705	14,09236	3,79E-06	3,082852
Dentro dos grupos	82992764	105	790407,3			
<b>Total</b>	<b>1,05E+08</b>	<b>107</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 39 - Resultado ANOVA para dissipação, na comparação de soluções analíticas, idade de 91 dias, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	19562715	2	9781358	37,32953773	5,67E-13	3,082852
Dentro dos grupos	27512865	105	262027,3			
<b>Total</b>	<b>47075580</b>	<b>107</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Ao analisar os p-valores encontrados nas análises de variância, foi possível constatar que na idade de 1 dia, não houve diferença estatística nas análises entre as três soluções analíticas, uma vez que o p-valor foi superior ao nível de significância (0,05). No entanto, foi constatada diferença estatística entre as soluções analíticas nas idades de 7 e 91 dias. Na Tabela 40 estão apresentadas as médias dos dados e os respectivos resultados do Teste de *Tukey*, para as idades de 7 e 91 dias. Ressalta-se que o teste foi realizado separadamente por idade. Com isso, as letras iguais, apenas dentro da mesma idade, representam médias que não apresentaram diferença estatística à 95% de confiabilidade pelo Teste de *Tukey* para as respectivas soluções analíticas. Como não houve diferença estatística entre as soluções para a idade de 1 dia, o Teste de *Tukey* não foi realizado.

Tabela 40 - Resultado Teste de *Tukey* para dissipação, em  $ms^{-1}$ , na comparação de soluções analíticas, para o lote PR-1.

Equação	IDADE		
	1 dia	7 dias	91 dias
<b>1D</b>	9,75	7,24 a	5,92 a
<b>2D</b>	9,06	6,68 b	5,36 b
<b>3D</b>	8,41	6,13 c	4,88 c

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

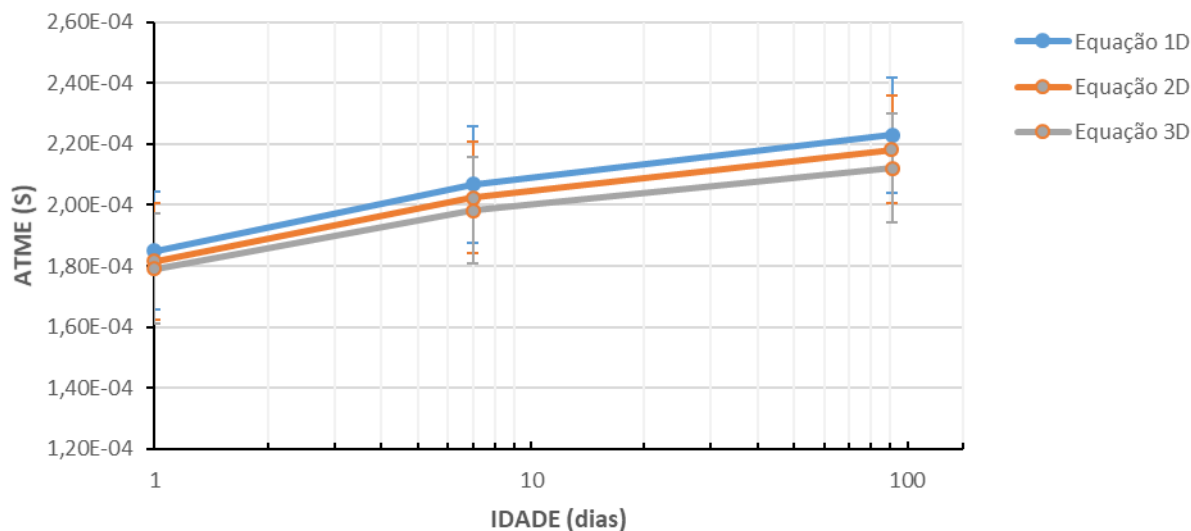
Com o Teste de *Tukey*, foi possível observar que nas análises em que houve diferença estatística, todas as soluções analíticas analisadas apresentaram diferença entre si. Ainda, de

maneira semelhante a difusividade, os valores médios da dissipação diminuíram da Equação 1D para 2D e 3D.

#### 5.2.4.3 ATME

Para a análise do parâmetro ATME, na Figura 38 é possível observar os resultados médios obtidos pelas equações 1D, 2D infinita e 3D infinita para as idades de 1, 7 e 91 dias. As barras apresentadas nos gráficos representam o desvio padrão das médias em cada idade e solução. A abcissa está em escala logarítmica de tempo.

Figura 38 - Resultados do parâmetros do ATME na comparação das soluções analíticas 1D, 2D e 3D, para o lote PR-1.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Ao analisar os dados apresentados na Figura 38 foi possível constatar que as diferenças entre os resultados obtidos para o parâmetro ATME, na comparação das soluções analíticas, foram graficamente menos expressivas em relação aos demais parâmetros discutidos anteriormente. Na idade de 1 dia, as médias das soluções 2D e 3D se sobrepõem.

Na Tabela 41, Tabela 42 e Tabela 43 estão apresentados os resultados de ANOVA realizados para comparação das médias das equações 1D, 2D infinita e 3D infinita para as idades de 1, 7 e 91 dias para o parâmetro do ATME, respectivamente.

Tabela 41 - Resultado ANOVA para ATME, na comparação de soluções analíticas, idade de 1 dia, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,5E-10	2	7,52E-11	0,214266	0,808661	3,402826
Dentro dos grupos	8,42E-09	24	3,51E-10			
Total	8,57E-09	26				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 42 - Resultado ANOVA para ATME, na comparação de soluções analíticas, idade de 7 dias, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,33E-09	2	6,66E-10	1,993457	0,141346	3,082852
Dentro dos grupos	3,51E-08	105	3,34E-10			
Total	3,64E-08	107				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 43 - Resultado ANOVA para ATME, na comparação de soluções analíticas, idade de 91 dias, para o lote PR-1.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,79E-09	2	4,4E-09	3,868251	0,023936	3,082852
Dentro dos grupos	1,19E-07	105	1,14E-09			
Total	1,28E-07	107				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Os resultados da ANOVA demonstram que não houve diferença estatística entre as médias do parâmetro ATME pelas diferentes soluções analíticas nas idades de 1 e 7 dias, uma vez que os p-valores obtidos foram superiores ao nível de significância. Na idade de 91 dias, foi constatada diferença estatística entre as soluções analíticas para o parâmetro ATME, considerando nível de significância de 5%. No entanto, ao realizar uma análise crítica do p-valor na análise aos 91 dias, é possível constatar que a diferença não é expressiva. Ao considerar o nível de significância de 10%, na análise do ATME, não seria constatada diferença estatística entre as soluções analíticas analisadas.

Para verificar quais soluções analíticas apresentaram diferença entre si na análise com o parâmetro do ATME, na Tabela 44 estão apresentadas as médias e os resultados do Teste de *Tukey* com os dados da idade de 91 dias. Ressalta-se que o teste foi realizado separadamente por idade. Com isso, as letras iguais, apenas dentro da mesma idade, representam médias que não apresentaram diferença estatística à 95% de confiabilidade pelo Teste de *Tukey* para as respectivas soluções analíticas. Como não houve diferença estatística entre as soluções para as idades de 1 e 7 dias, o Teste de *Tukey* não foi realizado.

Tabela 44 - Resultado Teste de *Tukey* para ATME, em s, na comparação de soluções analíticas, para o lote PR-1.

Equação	IDADE			
	1 dia	7 dias	91 dias	
<b>1D</b>	1,85E-04	2,07E-04	2,23E-04	a
<b>2D</b>	1,82E-04	2,02E-04	2,18E-04	ab
<b>3D</b>	1,79E-04	1,98E-04	2,12E-04	b

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Com o Teste de *Tukey*, foi possível constatar que na análise em que houve diferença estatística, apenas as soluções 1D e 3D diferenciaram-se entre si. Ainda, de maneira semelhante a difusividade e dissipação, os valores médios do ATME diminuíram da Equação 1D para 3D.

#### 5.2.4.4 Considerações finais sobre as soluções analíticas

Ao avaliar o comportamento dos resultados obtidos com as equações 1D, 2D infinita e 3D infinita foi possível constatar que todas as soluções analíticas analisadas são capazes de determinar os parâmetros difusos em corpos de prova prismáticos. No entanto, é válido ressaltar que na análise prévia dos resultados para a retirada de dados espúrios, a solução 1D apresentou resultados notadamente incoerentes, como valores de difusividade de aproximadamente 80 m<sup>2</sup>/s para algumas ondas ultrassônicas.

O parâmetro ATME foi o parâmetro com menor influência da solução analítica escolhida, uma vez que nas três idades analisadas, as soluções 2D e 3D infinitas não apresentaram diferença estatística. A diferença entre soluções foi observada apenas na idade de 91 dias, entre 1D e 3D infinita. Em relação aos parâmetros de difusividade e dissipação, pode-se considerar que nas idades mais avançadas, todas as soluções analíticas resultaram em valores estatisticamente diferentes. Com isso, pode-se concluir a não viabilidade de comparação de resultados obtidos por soluções analíticas distintas.

Outra análise passível de discussão na comparação entre as soluções analíticas nos parâmetros difusos foi em relação as variabilidades. Na Figura 36, Figura 37 e Figura 38 é possível observar que as barras de erros, representativas dos desvios padrões nas respectivas médias, tiveram grandezas similares em todas as análises. Essa conclusão foi obtida pela não existência de barras de erros discrepantes em nenhuma das médias. A maior diferença nas variabilidades foi verificada para o parâmetro da difusividade, na idade de 7 dias, com variações de 18,27% para Equação 1D, 15,77% para Equação 2D e 13,74% para Equação 3D. Assim, a

variabilidade dos dados confirmou a viabilidade de utilização das três soluções analíticas analisadas em corpos de prova prismáticos, com as características da presente pesquisa.

Com os resultados e discussões apresentadas na comparação de três equações espera-se que a solução analítica não influencie na conclusão dos resultados obtidos em análises de comparação em pesquisa laboratorial e, até mesmo, inspeção de campo. Em um material elástico heterogêneo como o concreto, a onda ultrassônica pode se propagar por todas as direções da amostra (ANUGONDA; WIEHN; TURNER, 2001; RAMAMOORTHY; KANE; TURNE, 2004). No entanto, as soluções 1D e 2D simplificam a solução analítica considerando direções preferenciais de propagação. Com isso, é válido destacar que apesar de não haver na literatura científica análises de corpos de prova prismáticos com soluções 1D, a utilização da solução mais simples existente atualmente na teoria resultou em resultados admissíveis em análises de corpos de prova prismáticos, considerando as particularidades desta pesquisa.

### 5.3 ANÁLISES RELACIONADAS AO MATERIAL

As análises relacionadas ao material consistiram na análise da influência do avanço da idade do concreto após o endurecimento nos parâmetros difusos, correlação dos parâmetros difusos influenciados pelo avanço da idade do concreto com a resistência à compressão e na verificação da influência da dimensão do agregado graúdo.

Para isso, primeiramente foram analisados os ensaios nas duas placas de concreto, dos lotes PL-1 e PL-2, em idades que variaram de 1 a 135 dias. Ainda, foram realizados ensaios em três prismas de concreto em idades mais espaçadas, variando de 1 a 91 dias, nomeados como PR-1. Os ensaios realizados nos prismas de concreto tiveram como objetivo confirmar os resultados obtidos para as placas. A apresentação dos resultados desta etapa iniciará pelos resultados obtidos para as placas de concreto, seguindo dos resultados para os prismas.

Após verificados quais parâmetros foram influenciados pelo avanço da idade do concreto, foi realizada a correlação destes parâmetros com a resistência à compressão do concreto, para as placas e prismas de concreto. A última análise em relação ao material consistiu na verificação da influência da dimensão do agregado graúdo, em primas de concreto concretados com agregados graúdos de dimensão maior e menor que o comprimento de onda médio, dos lotes PR-1 e PR-2, respectivamente.

As configurações de ensaio foram semelhantes às realizadas para as verificações da geometria da amostra, para os respectivos formatos de corpo de prova.

### 5.3.1 Evolução dos parâmetros difusos no tempo

#### 5.3.1.1 Placas de concreto – lote PL

Para verificar a sensibilidade dos parâmetros difusos com a progressão da idade do concreto, foram realizadas leituras nas idades de 1 a 28 dias no Lote PL-1 e de 1 a 135 dias no Lote PL-2. Durante a execução dos ensaios de ultrassom, houve alterações nos ganhos de captação das ondas ultrassônicas.

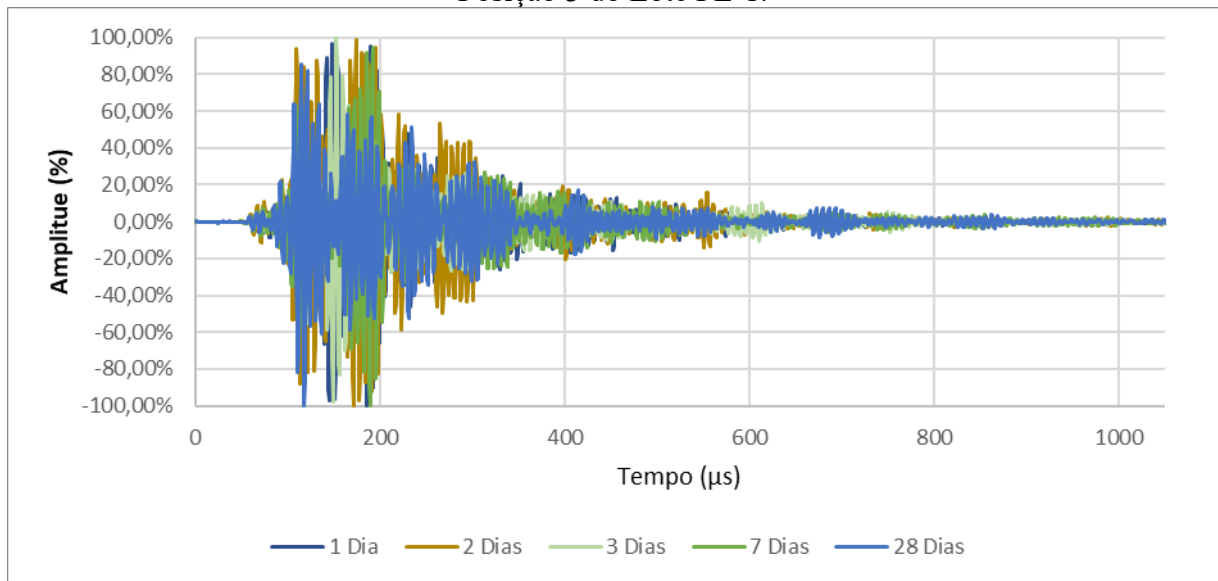
Para exemplificar os sinais obtidos ao longo do tempo, nas Figura 39 e Figura 40 estão apresentadas ondas ultrassônicas captadas em uma mesma posição para todas as idades analisadas em cada lote. As figuras são respectivas aos Lote PL-1 e Lote PL-2. Dentre as 70 ondas obtidas por posição em cada idade, a representação gráfica se refere a uma onda escolhida aleatoriamente.

Assim como para a determinação dos parâmetros, nas representações gráficas os sinais ultrassônicos foram normalizados a partir da maior amplitude para cada onda. Visto que a amplitude é dependente do ganho estabelecido na captação da onda, a normalização garante melhor visualização do comportamento da onda *coda*.

Como pode ser observado nas Figura 39 e Figura 40, não há alteração de comportamento padrão nas características de chegada da onda *coda* relacionada ao avanço da idade do concreto. As diferenças obtidas entre as ondas nas várias idades se referem a aleatoriedade do meio, uma vez que a presença de heterogeneidades ocasiona distorções na fase e amplitude dos formatos da onda incoerente no decorrer do tempo de propagação, conforme citam Planès et al. (2014).

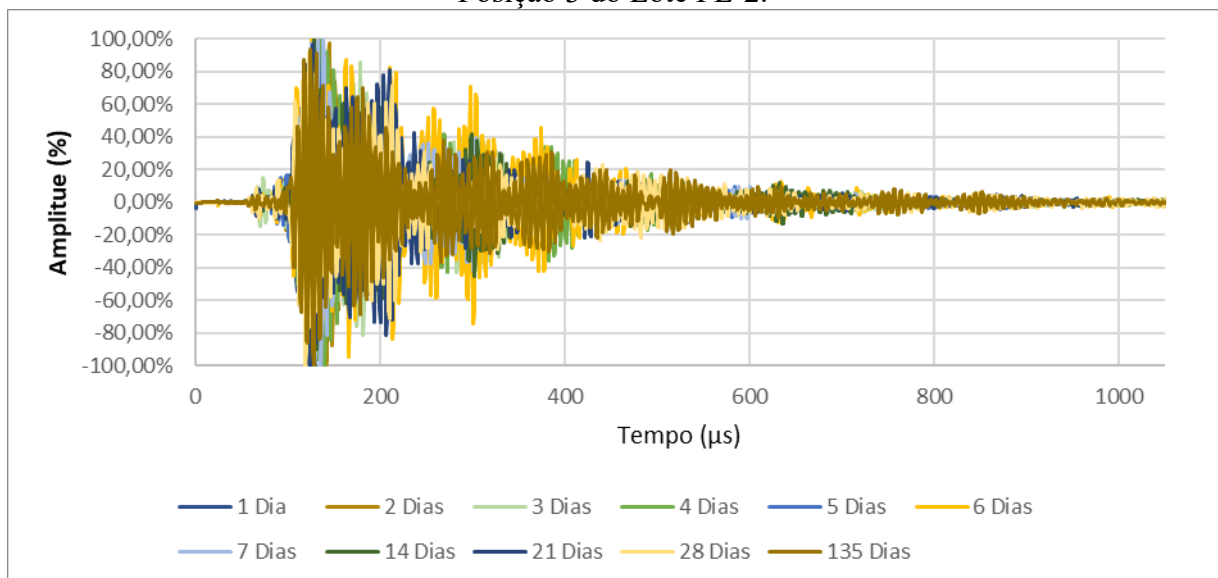


Figura 39 – Representação gráfica das ondas ultrassônicas obtidas ao longo do tempo para a Posição 3 do Lote PL-1.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 40 - Representação gráfica das ondas ultrassônicas obtidas ao longo do tempo para a Posição 3 do Lote PL-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

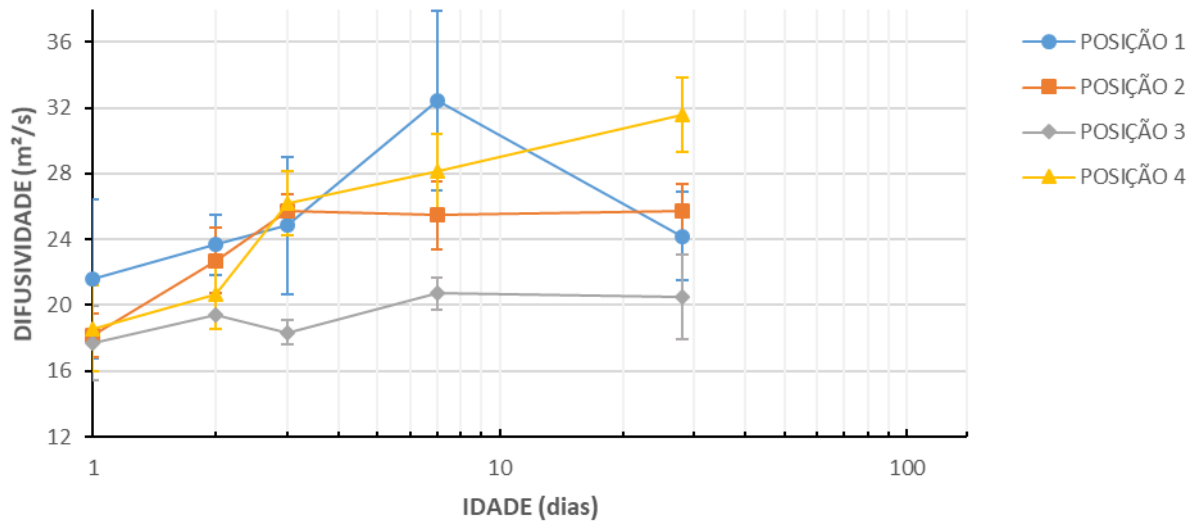
Outra conclusão obtida através da representação gráfica é em relação ao tempo necessário de análise da onda para avaliar toda a onda incoerente. Como pode ser observado, a partir de 1000 μs há somente a presença de ruído. Isso demonstra que a análise dos primeiros 5 ms (5000 μs) da onda é suficiente para obtenção de resultados confiáveis dos parâmetros difusos pelo método da difusão ultrassônica.

#### 5.3.1.1.1 Difusividade ultrassônica

O primeiro parâmetro difuso apresentado é a difusividade ultrassônica ou coeficiente de difusão,  $D$  ( $m^2/s$ ). Na Figura 41 é possível observar os resultados da difusividade ultrassônica obtidos para as posições 1, 2, 3 e 4 nas idades de 1 a 28 dias do Lote PL-1. Na Figura 42, observa-se os resultados da difusividade obtidos para as posições 1, 2, 3 e 4 nas idades de 1 a 135 dias do Lote PL-2. As posições representadas referem-se àquelas analisadas desde o primeiro dia de idade. As barras apresentadas nos gráficos representam o desvio padrão das médias em cada idade. A abcissa está em escala logarítmica de tempo.

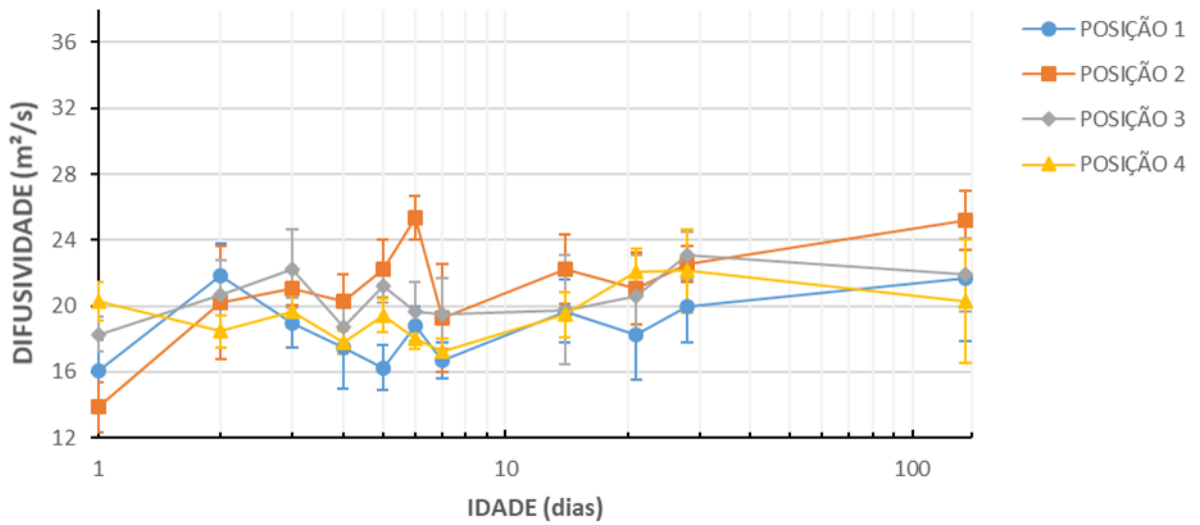
Por meio da análise visual dos gráficos apresentados, observa-se uma leve tendência de aumento nos valores da difusividade com a progressão da idade do concreto analisado. Porém, em algumas idades, a média dos dados extrapola essa tendência, apresentando valores a cima do esperado. Valores explícitos nas idades de 7 dias para a posição 1 do Lote PL-1 e de 6 dias para a posição 2 do Lote PL-2, os quais apresentaram resultados superiores as médias de cada lote em 34,64% e 17,06%, respectivamente. Essas alterações ressaltam o comportamento aleatório de dispersão das ondas ultrassônicas em meios heterogêneos, indicando que, para as considerações da presente pesquisa, a análise em apenas uma posição não representa a evolução do endurecimento do concreto com o tempo em toda a estrutura analisada. Diante disso, na Figura 43 estão apresentados os resultados médios de todas as posições ensaiadas em cada idade para os Lotes PL-1 e PL-2. As barras apresentadas nos gráficos representam o desvio padrão das médias em cada idade. A abcissa está em escala logarítmica de tempo.

Figura 41 – Resultados do parâmetro de difusividade das posições 1, 2, 3 e 4 analisadas no Lote PL-1 nas idades de 1 a 28 dias.



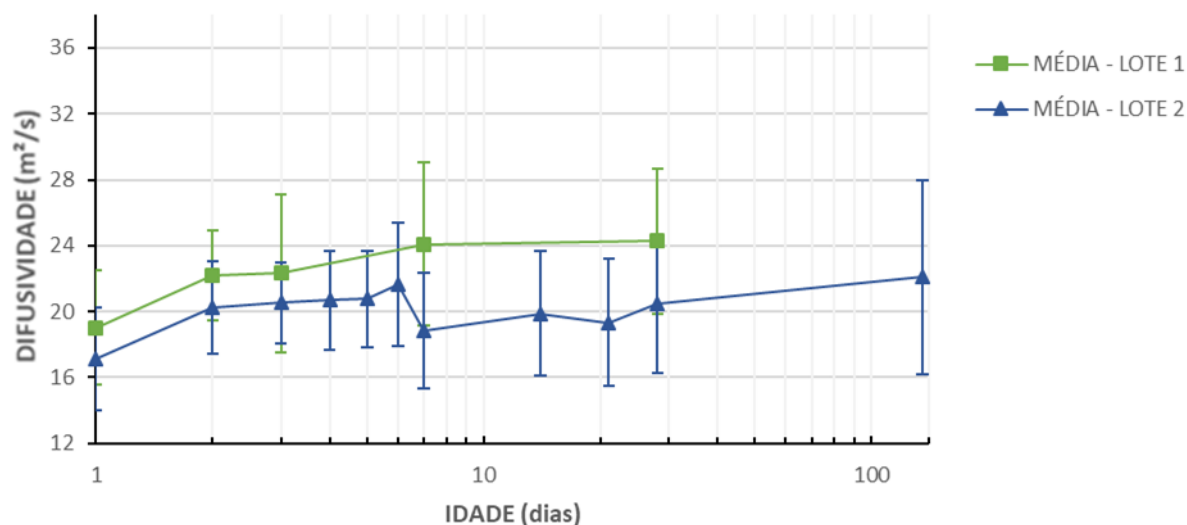
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 42 - Resultados do parâmetro de difusividade das posições 1, 2, 3 e 4 analisadas no Lote PL-2 nas idades de 1 a 135 dias.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 43 – Média dos resultados do parâmetro de difusividade obtidos para todas as posições analisadas em cada idade para o Lote PL-1 e Lote PL-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Pela análise das médias de todas as posições, pode se observar um comportamento mais explícito do aumento das médias do parâmetro da difusividade com a progressão da idade do concreto, mesmo com uma queda nos valores entre 6 e 7 dias de idade para o Lote PL-2. No entanto, como as barras de erros se sobrepõem, para a verificação do real comportamento do parâmetro da difusividade ultrassônico, além das análises gráficas, foram realizadas análises estatísticas por ANOVA. Os testes tiveram como objetivo verificar a igualdade das médias das amostras a 95% de confiabilidade. Na Tabela 45 e na Tabela 46 estão apresentados os resultados da ANOVA realizadas para os Lotes PL-1 e PL-2, respectivamente.

Tabela 45 – Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PL-1, para o parâmetro da difusividade com as médias das posições.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	124,17	4	31,04	2,27	0,072358	2,53
Dentro dos grupos	806,91	59	13,68			
<b>Total</b>	<b>931,08</b>	<b>63</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 46 – Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PL-2, para o parâmetro da difusividade com as médias das posições.

Fonte da variação	SQ	GL	MS	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	196,346	10	19,63	1,719	0,08122	1,89
Dentro dos grupos	1701,49	149	11,42			
<b>Total</b>	<b>1897,84</b>	<b>159</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Com a análise estatística realizada com as médias das posições por idade, foi constatado que não há diferença estatística entre as idades para o parâmetro da difusão, uma vez que os p-valoros foram superiores ao nível de significância (0,05).

Diante disso, concluiu-se que apesar de graficamente o parâmetro da difusividade apresentar uma tendência de aumento com a evolução da idade, estatisticamente o parâmetro não sofreu alterações. Ou seja, o envelhecimento do concreto não ocasionou variações no parâmetro da difusividade após a idade de um dia, considerando as configurações de ensaio e análise da presente pesquisa.

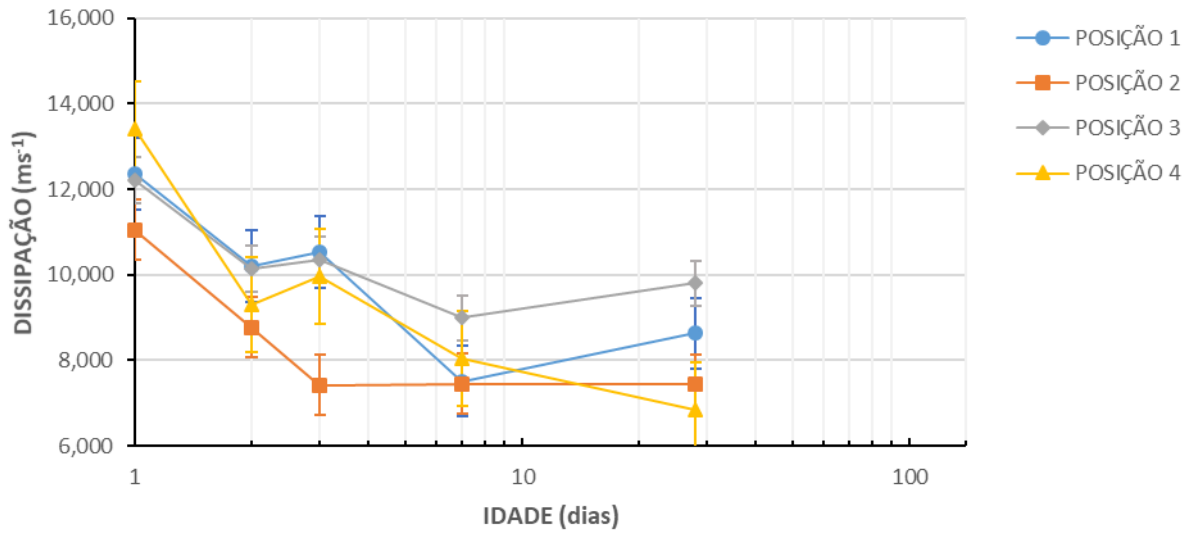
A difusividade ultrassônica está relacionada à dissipação da energia devido aos elementos dispersores, ou seja, aos agregados graúdos na presente pesquisa. Como não houve alterações em relação aos agregados nas análises no decorrer do tempo, o comportamento da difusividade foi semelhante para todas as idades.

#### 5.3.1.1.2 Dissipação

A fim de verificar se o parâmetro da dissipação,  $\sigma$  ( $s^{-1}$ ), apresentou diferenças com a evolução da idade do concreto, na Figura 44 e na Figura 45 são apresentados os resultados da dissipação obtidos para as posições 1, 2, 3 e 4 nas idades de 1 a 28 dias do Lote PL-1 e nas idades de 1 a 135 do Lote PL-2, respectivamente. As barras apresentadas nos gráficos representam o desvio padrão das médias em cada idade. A abcissa está em escala logarítmica de tempo.

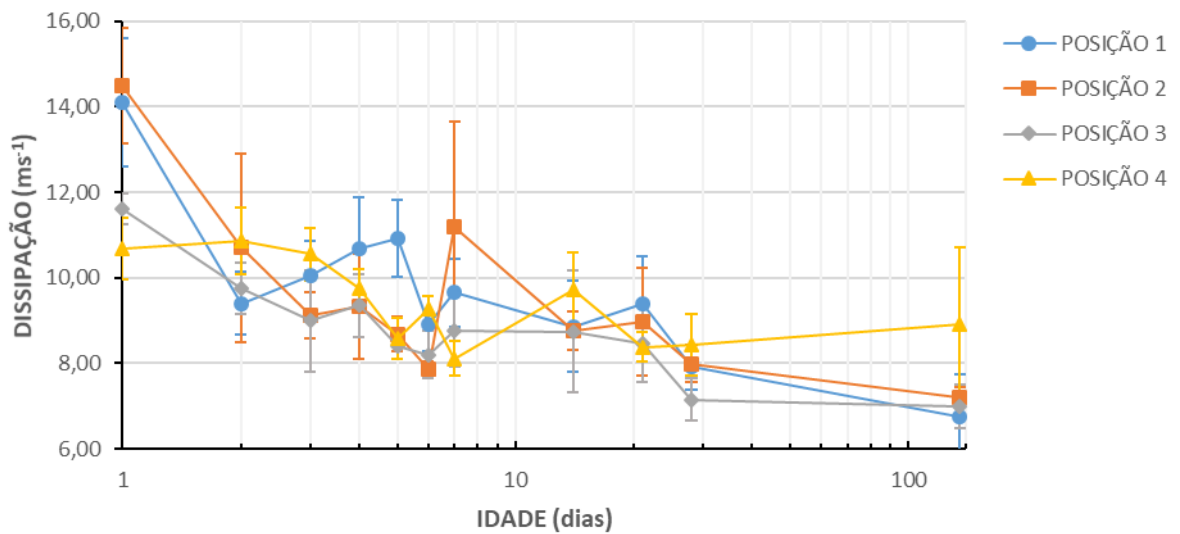
Ao contrário da difusividade, a análise visual dos gráficos da dissipação indica uma tendência de diminuição nos valores da dissipação com a progressão da idade do concreto. Em idades mais espaçadas, a diminuição é mais expressiva. Porém, assim como no primeiro parâmetro apresentado, para determinadas posições e idades, os dados extrapolam a tendência decrescente. Na idade de 7 dias do Lote PL-2, por exemplo, o valor pontual da posição 2 é 23,02% maior que média do lote. Isso resulta na mesma conclusão obtida para a difusividade, ou seja, que são necessárias análises em diversas posições para representar, através dos parâmetros difusos, a evolução do endurecimento do concreto com o tempo em toda a estrutura analisada. Diante disso, na Figura 46 estão apresentados os resultados médios do parâmetro da dissipação de todas as posições analisadas em cada idade para o Lote PL-1 e Lote PL-2. As barras apresentadas nos gráficos representam o desvio padrão das médias em cada idade. A abcissa está em escala logarítmica de tempo.

Figura 44 - Resultados do parâmetro de dissipação das posições 1, 2, 3 e 4 analisadas no Lote PL-1 nas idades de 1 a 28 dias.



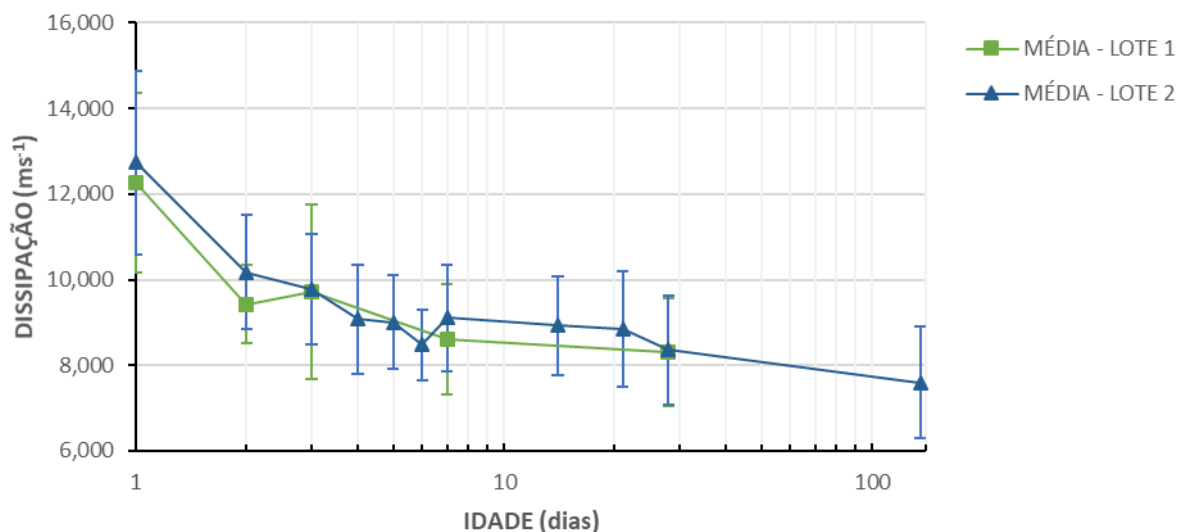
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 45 - Resultados do parâmetro de dissipação das posições 1, 2, 3 e 4 analisadas no Lote PL-2 nas idades de 1 a 135 dias.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 46 - Média dos resultados do parâmetro de dissipação obtidos para todas as posições analisadas em cada idade para o Lote PL-1 e Lote PL-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na análise das médias dos dados de dissipação para os dois lotes analisados, a tendência decrescente dos parâmetros com o avanço da idade do concreto é mais evidente. A taxa de dissipação está relacionada ao atrito interno e descreve a absorção da onda ultrassônica. Ainda, caracteriza as propriedades viscoelásticas do material intrínsecas a matriz da pasta de cimento, sendo sensível a pequenas variações na matriz, como o tempo de cura (ANUGONDA; WIEHN, TURNER, 2001; PUNURAI *et al.*, 2007; YIM; AN; KIM, 2016). Com isso, era esperado que o avanço da idade do concreto ocasionasse alterações no parâmetro da dissipação.

Com o avanço da idade, a microestrutura do concreto tende a ser mais homogênea. Microestruturas mais homogêneas implicam em menor perda da energia da onda ocasionada por heterogeneidades de hidratação na própria matriz cimentícia. Com isso, a absorção durante a propagação da onda ultrassônica com o envelhecimento do concreto tende a diminuir, resultando em menor dissipação.

Para confirmar as diferenças ocasionadas no parâmetro da dissipação com o decorrer do tempo observadas graficamente, foram realizadas análises estatísticas por ANOVA e Teste de *Tukey*. O Teste de *Tukey* foi realizado com o auxílio do *software Statistica*. As definições de resultado para o teste estatístico são as mesmas apresentadas para a difusividade.

Para as análises com a média das posições por idade, na Tabela 47 e na Tabela 48 estão apresentados os resultados da ANOVA realizadas para os Lotes PL-1 e PL-2, respectivamente.

Na Tabela 49 estão apresentados os resultados para o Lote PL-1 e na Tabela 50, para o Lote PL-2, referentes a média, desvio padrão, coeficiente de variação e Teste de *Tukey*.

Tabela 47 – Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PL-1, para o parâmetro da dissipação com as médias das posições.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6,207E+07	4	1,552E+07	15,988	<0,01	2,53
Dentro dos grupos	5,726E+07	59	9,706E+05			
<b>Total</b>	<b>1,19e+08</b>	<b>63</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 48 – Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PL-2, para o parâmetro da dissipação com as médias das posições.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	1,309E+08	10	1,309E+07	16,20	<0,01	1,90
Dentro dos grupos	1,121E+08	149	7,571E+05			
<b>Total</b>	<b>2,4E+08</b>	<b>159</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 49 – Média, desvio padrão, coeficiente de variação e comparação múltipla dos resultados obtidos para a dissipação do Lote PL-1, por idade, com a média das posições.

Idade (dias)	Média (ms <sup>-1</sup> )	Desvio Padrão (ms <sup>-1</sup> )	CV(%)
1	12,257a	0,967	7,890
2	9,428b	0,629	6,668
3	9,508b	1,341	14,102
7	8,563bc	0,956	11,163
28	8,249c	0,875	10,610

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Médias seguidas por letras iguais não apresentam diferença estatística pelo Teste de *Tukey*, a 95% de confiabilidade.

Diferente do parâmetro da difusividade, para o parâmetro da dissipação as análises estatísticas demonstraram diferença significativa, uma vez que os p-valores obtidos foram inferiores ao nível de significância. Com isso, pode-se constatar que para as características de ensaio e análise da presente pesquisa, os valores obtidos para o parâmetro da dissipação apresentaram maior sensibilidade ao avanço da idade do concreto, em comparação com o parâmetro da difusividade.



Tabela 50 - Média, desvio padrão, coeficiente de variação e comparação múltipla dos resultados obtidos para a dissipação do Lote PL-2, por idade, com a média das posições.

<b>Idade (dias)</b>	<b>Média (ms<sup>-1</sup>)</b>	<b>Desvio Padrão (ms<sup>-1</sup>)</b>	<b>CV(%)</b>
1	12,726a	1,861	14,621
2	10,176b	1,861	18,285
3	9,672bc	0,823	8,504
4	9,154bcd	0,883	9,642
5	9,024bcd	0,722	7,998
6	8,555cd	0,604	7,057
7	9,125bcd	0,767	8,407
14	8,959cd	0,696	7,767
21	8,773cd	0,992	11,310
28	8,302de	1,008	12,141
135	7,532e	1,021	13,562

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

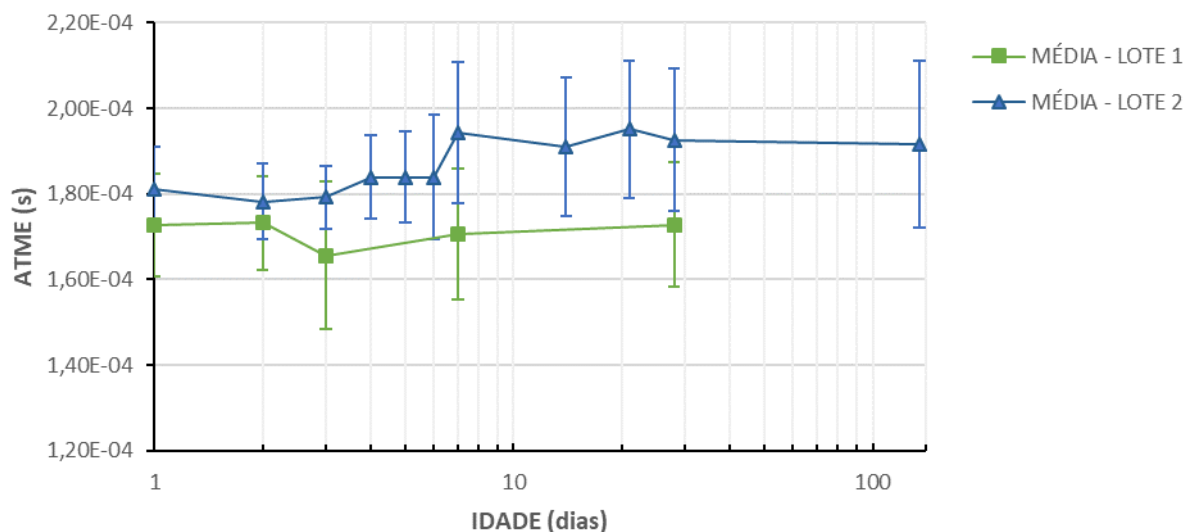
Médias seguidas por letras iguais não apresentam diferença estatística pelo Teste de *Tukey*, a 95% de confiabilidade.

Para ambos os lotes, as idades mais espaçadas apresentam diferença significativa entre si. Isso é observado nas diferenças obtidas entre as idades de 1, 2 a 21 e 28 dias pelo Teste de *Tukey*, para todas as análises. Entre 2 a 21 dias, houve diferenças entre as idades de maneira aleatória em cada lote. Com isso, foi possível concluir de maneira explícita que as análises nas idades de 1 e 28 dias ocasionaram diferenças na dissipação em decorrência do envelhecimento do concreto.

#### 5.3.1.1.3 ATME

Não obstante as análises dos parâmetros de difusividade e dissipação, também foi analisado o parâmetro relacionado ao tempo de chegada do pico de amplitude máxima da energia difusa (ATME). Como ilustrado pelos dois parâmetros anteriormente citados, a análise gráfica do conjunto de posições representa com mais sensibilidade as alterações nos parâmetros difusos. Dessa forma, os resultados gráficos apresentados para o ATME são apenas em função das médias de cada lote. Na Figura 47 estão apresentadas as médias obtidas para o parâmetro ATME para o Lote PL-1 nas idades de 1, 2, 3, 7 e 28 dias e para o Lote PL-2 nas idades de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 28 e 135 dias, com a média das posições. As barras apresentadas nos gráficos representam o desvio padrão das médias em cada idade. A abcissa está em escala logarítmica de tempo.

Figura 47 - Média dos resultados do parâmetro de ATME obtidos para todas a posições analisadas em cada idade para o Lote PL-1 e Lote PL-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Diferente dos parâmetros de difusividade e dissipação que apresentaram uma tendência de comportamento visível nos gráficos de média com o avanço da idade do concreto para ambos os lotes, o parâmetro de ATME denotou um padrão menos expressivo, uma vez que o Lote PL-1 apresentou decréscimo na média seguido de constância e o Lote PL-2 apresentou crescimento. Assim, para melhor verificar as diferenças obtidas com a evolução da idade do concreto foram realizadas análises de variância a 95% de confiabilidade, para o parâmetro ATME em ambos os lotes.

Na Tabela 51 e na Tabela 52 estão apresentados os resultados da ANOVA realizadas para os Lotes PL-1 e PL-2, respectivamente.

Tabela 51 – Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PL-1, para o parâmetro da ATME com as médias das posições.

Fonte da variação	SQ	GL	MS	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	1,02E-09	4	2,55E-10	1,300	0,280	2,58
Dentro dos grupos	1,16E-08	59	1,96E-10			
Total	1,26E-08	63				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 52 – Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PL-2, para o parâmetro da ATME com as médias das posições.

Fonte da variação	SQ	GL	MS	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	4,60E-09	10	4,59E-10	2,46	0,00943	1,89
Dentro dos grupos	2,79E-08	149	1,88E-10			
Total	3,23E-08	159				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Com a análise estatística realizada, foi constatado que não houve diferença estatística entre as idades para o ATME na análise do Lote PL-1, uma vez que o p-valor foi superior ao nível de significância (0,05). Para o Lote PL-2, a ANOVA demonstrou que há diferença estatística entre as idades. No entanto, de maneira incoerente à ANOVA, o Teste de *Tukey* resultou na igualdade das médias para todas as idades, conforme apresentado na Tabela 53.

Tabela 53 - Média, desvio padrão, coeficiente de variação e comparação múltipla dos resultados obtidos para o ATME do Lote PL-2, por idade, com a média das posições.

Idade (dias)	Média (s)	Desvio Padrão (s)	CV(%)
1	1,81E-04a	7,96E-06	4,396
2	1,78E-04a	6,25E-06	3,504
3	1,79E-04a	4,40E-06	2,455
4	1,85E-04a	8,73E-06	4,726
5	1,85E-04a	9,52E-06	5,144
6	1,85E-04a	1,34E-05	7,271
7	1,94E-04a	1,55E-05	7,947
14	1,91E-04a	1,47E-05	7,723
21	1,94E-04a	1,52E-05	7,844
28	1,93E-04a	1,53E-05	7,922
135	1,91E-04a	1,76E-05	9,186

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

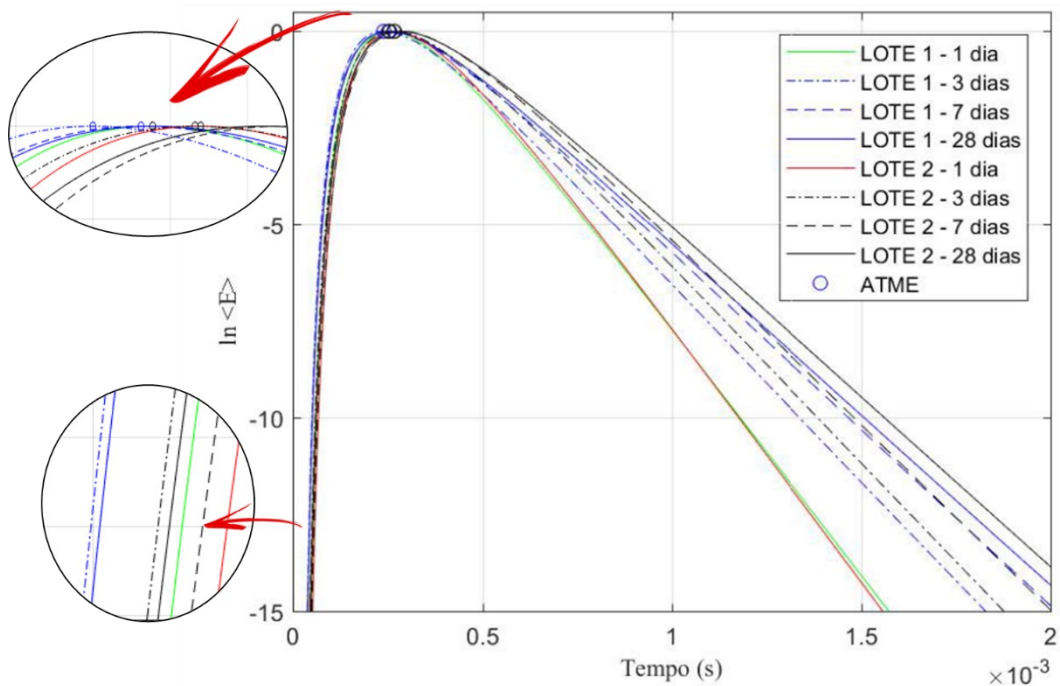
Com esses resultados, pode-se concluir que na análise das placas de concreto o ATME não sofreu influência do avanço da idade do concreto após a idade de um dia, considerando as configurações de ensaio e análise da presente pesquisa.

#### 5.3.1.1.4 Comparação entre os parâmetros

Para melhor visualizar os padrões de comportamento dos parâmetros analisados até o momento, na Figura 48 estão apresentadas as curvas da densidade de energia espectral obtidas analiticamente pelo domínio 2D infinito. As curvas foram plotadas fixando os valores médios

obtidos para os parâmetros de difusividade e dissipação, para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Ao fixar esses valores, foram geradas curvas de densidade analíticas normalizadas, sendo calculados e representados novos valores respectivos de ATME. Apesar da representação do último parâmetro não contemplar os valores exatos, segue o mesmo padrão de valores obtidos para o ATME.

Figura 48 – Representação gráfica da curva de densidade de energia espectral analítica com base nos parâmetros médios obtidos para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias dos Lotes PL-1 e PL-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Através da Figura 48 é evidente que o parâmetro mais sensível às alterações no concreto com o avanço da idade foi a dissipação. Com a evolução da idade e consequente envelhecimento do concreto, os valores da dissipação diminuíram, resultando em decaimentos mais íngremes, como pode ser observado na imagem.

Em relação a difusividade, é visível no detalhe da Figura 48 uma possível diminuição de seus valores o avanço da idade do concreto, considerando espaçamentos de idades maiores (1, 7 e 28 dias). No entanto, a diferença entre os valores foi pouco expressiva, conforme constatado na análise estatística, resultando na igualdade da difusividade para as diferentes idades analisadas.

Na representação do ATME, destacado no detalhe do pico das curvas e na mudança de inclinação, é evidenciada a sobreposição de valores do ATME com o avanço da idade do concreto, indicando que o parâmetro não foi influenciado pelo envelhecimento do concreto.

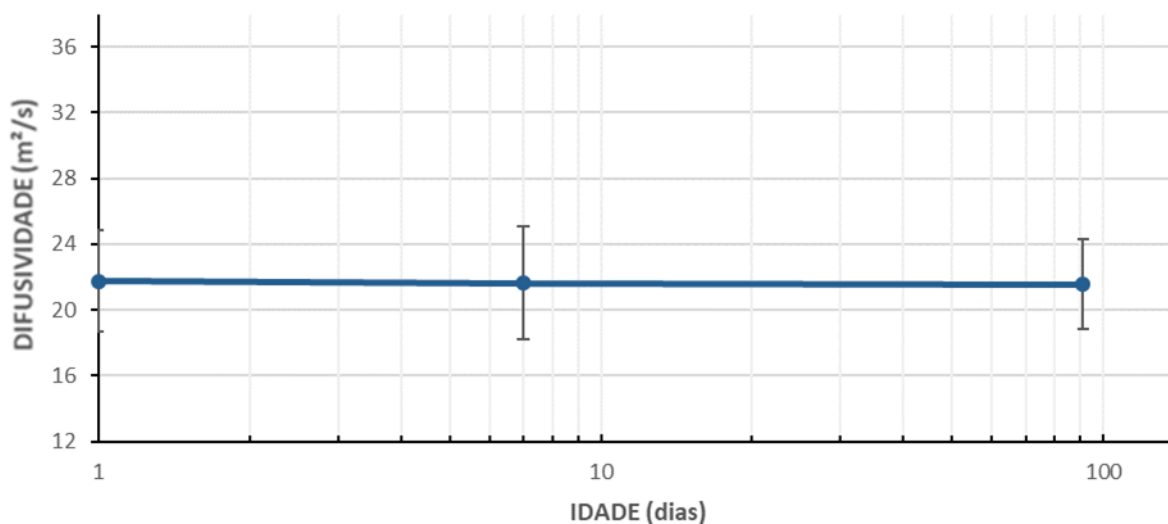
### 5.3.1.2 Prismas de concreto – Lote PR

Para confirmar os resultados obtidos com as placas de concreto na verificação da influência do avanço da idade do concreto após o endurecimento nos parâmetros difusos, foram realizadas análises com os prismas de concreto. De maneira semelhante ao lote PL, os resultados serão apresentados por parâmetro difuso.

#### 5.3.1.2.1 Difusividade ultrassônica

Para verificar os resultados obtidos para a difusividade ultrassônica,  $D$  ( $m^2/s$ ), na Figura 49 é possível observar os resultados médios de todas as posições ensaiadas nas idades de 1, 7 e 91 dias do Lote PR-1. As barras apresentadas nos gráficos representam o desvio padrão das médias em cada idade. A abcissa está em escala logarítmica de tempo.

Figura 49 - Média dos resultados do parâmetro de difusividade obtidos para todas as posições analisadas em cada idade para o Lote PR-1.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Graficamente foi possível observar que a difusividade não sofreu influência do avanço da idade do concreto, uma vez que não houve uma tendência de aumento ou diminuição dos

valores médios com o passar do tempo. Ressalta-se que graficamente os resultados com os prismas foram mais expressivos na não influência da idade no parâmetro da difusividade quando comparado com os gráficos obtidos com as placas.

Na Tabela 54 está apresentado o resultado da ANOVA para a difusividade, considerando o Lote PR-1.

Tabela 54 - Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PR-1, para o parâmetro da difusividade com as médias das posições.

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Entre grupos</b>	0,293357	2	0,146679	0,015282	0,984837	3,113792
<b>Dentro dos grupos</b>	748,661	78	9,598219			
<b>Total</b>	748,9544	80				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

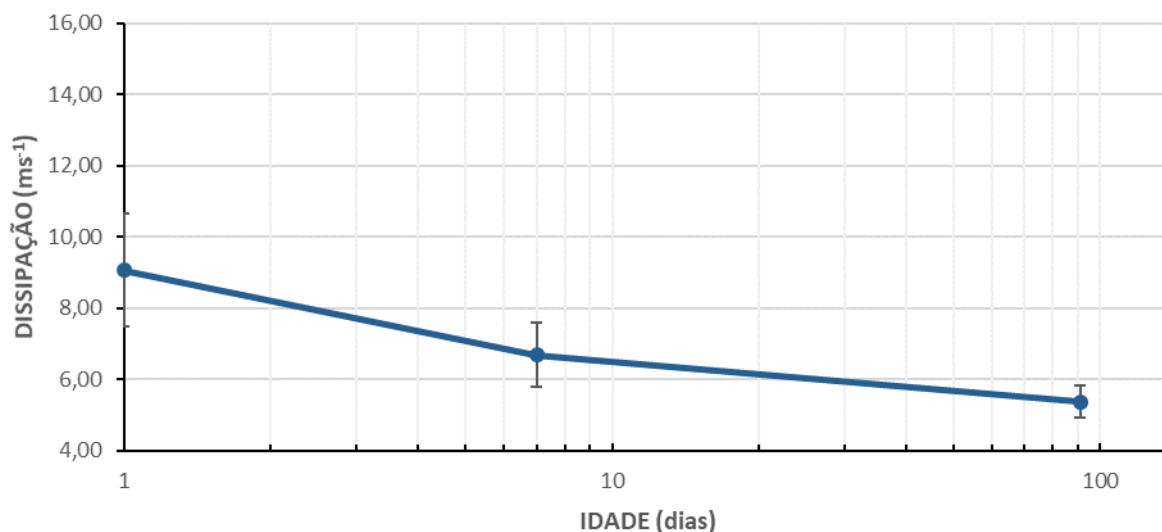
Como esperado pela análise gráfica, a ANOVA indicou que não há diferença estatística entre as idades para o parâmetro da difusão, uma vez que o p-valor foi superior ao nível de significância (0,05).

Com isso, confirma-se que, considerando as características intrínsecas a presente pesquisa, o parâmetro da difusividade não foi influenciado pelo avanço da idade do concreto. No entanto, se faz necessário novas pesquisas para que a conclusão possa ser generalizada para outras configurações de ensaio e análise dos parâmetros difusos.

#### 5.3.1.2.2 Dissipação

Para verificar os resultados obtidos para a dissipação,  $\sigma$  ( $s^{-1}$ ), na Figura 50 é possível observar os resultados médios de todas as posições ensaiadas nas idades de 1, 7 e 91 dias do Lote PR-1. As barras apresentadas nos gráficos representam o desvio padrão das médias em cada idade. A abscissa está em escala logarítmica de tempo.

Figura 50 - Média dos resultados do parâmetro de dissipação obtidos para todas as posições analisadas em cada idade para o Lote PR-1.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Graficamente é possível observar o comportamento explícito de diminuição da dissipação com o avanço da idade do concreto. Através dos resultados obtidos na análise com as placas de concreto, era esperado que ao verificar a dissipação em idades mais espaçadas, os resultados fossem descendentes com o passar do tempo.

Na Tabela 55 está apresentado o resultados da ANOVA para a dissipação, considerando o Lote PR-1. Na Tabela 56 estão apresentados os resultados para o Lote PR-1, referentes a média, desvio padrão, coeficiente de variação e Teste de *Tukey*.

Tabela 55 - Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PR-1, para o parâmetro da dissipação com as médias das posições.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,05E+08	2	52591437	74,84497	<0,01	3,113792
Dentro dos grupos	54808390	78	702671,7			
<b>Total</b>	<b>1,6E+08</b>	<b>80</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 56 - Média, desvio padrão, coeficiente de variação e comparação múltipla dos resultados obtidos para a dissipação do Lote PR-1, por idade, com a média das posições.

Idade (dias)	Média (ms <sup>-1</sup> )	Desvio Padrão (ms <sup>-1</sup> )	CV(%)
1	9,058 a	1,591	17,562
7	6,681 b	0,889	13,302
91	5,361 c	0,445	8,295

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Médias seguidas por letras iguais não apresentam diferença estatística pelo Teste de *Tukey*, a 95% de confiabilidade.

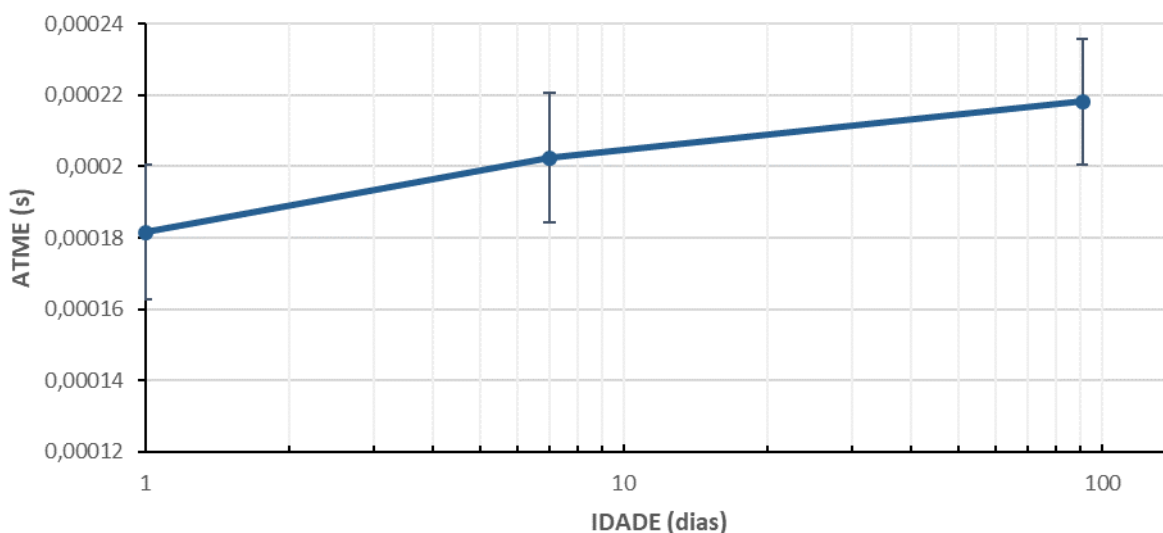
Confirmando a premissa de decrescimento da dissipação com o avanço da idade do concreto, a ANOVA para as médias de dissipação apresentou diferença estatística, uma vez que o p-valor foi inferior ao nível de significância. Ainda, o Teste de Tukey confirmou a diferença entre todas as idades analisadas (1, 7 e 91 dias), sendo a maior média referente a idade de 1 dia e a menor, 91 dias.

Apesar do comportamento da dissipação com o avanço da idade ser similar em ambos os formatos de corpo de prova analisados, é necessária a realização de novas pesquisas para que a conclusão possa ser generalizada para outras configurações de ensaio e análise dos parâmetros difusos.

### 5.3.1.2.3 ATME

Para verificar os resultados obtidos para o ATME, em s, na Figura 51 é possível observar os resultados médios de todas as posições ensaiadas nas idades de 1, 7 e 91 dias do Lote PR-1. As barras apresentadas nos gráficos representam o desvio padrão das médias em cada idade. A abcissa está em escala logarítmica de tempo.

Figura 51 - Média dos resultados do parâmetro ATME obtidos para todas as posições analisadas em cada idade para o Lote PR-1.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Diferentemente dos resultados apresentados para a placa de concreto, na análise com os corpos de prova prismáticos foi possível observar graficamente o crescimento dos valores



médios para o parâmetro ATME com o avanço da idade do concreto. Para verificar tal consideração, na Tabela 57 está apresentado o resultado para a ANOVA, realizada para o Lote PR-1. Na Tabela 58 estão apresentados os resultados para o Lote PR-1, referentes a média, desvio padrão, coeficiente de variação e Teste de *Tukey*.

Tabela 57 - Resultado ANOVA para comparação de idades do Lote PR-1, para o parâmetro ATME com as médias das posições.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,12E-08	2	5,58E-09	17,10085	<0,01	3,113792
Dentro dos grupos	2,54E-08	78	3,26E-10			
<b>Total</b>	<b>3,66E-08</b>	<b>80</b>				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 58 - Média, desvio padrão, coeficiente de variação e comparação múltipla dos resultados obtidos para o ATME do Lote PR-1, por idade, com a média das posições.

Idade (dias)	Média (s)	Desvio Padrão (s)	CV(%)
<b>1</b>	1,82E-07 c	1,90E-08	10,452
<b>7</b>	2,02E-07 b	1,82E-08	8,993
<b>91</b>	2,18E-07 a	1,77E-08	8,108

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Confirmando o comportamento gráfico do parâmetro ATME, o resultado da ANOVA constatou diferença estatística significativa entre as idades. Ainda, o Teste de *Tukey* determinou o crescimento do ATME com o avanço da idade do concreto, uma vez que o menor valor foi obtido para a idade de 1 dia, seguido do aumento do parâmetro para a idade de 7 dias e maior valor para a idade de 91 dias.

O comportamento de aumento do ATME pode estar relacionado com a dependência desse parâmetro à difusividade e dissipação. Conforme cita Quiviger et al. (2012), o ATME diminui com o aumento dos valores de ambos os parâmetros. Porém, na presente pesquisa a difusividade se manteve constante e a dissipação diminuiu com o passar do tempo, causando impacto direto no aumento das médias para o ATME.

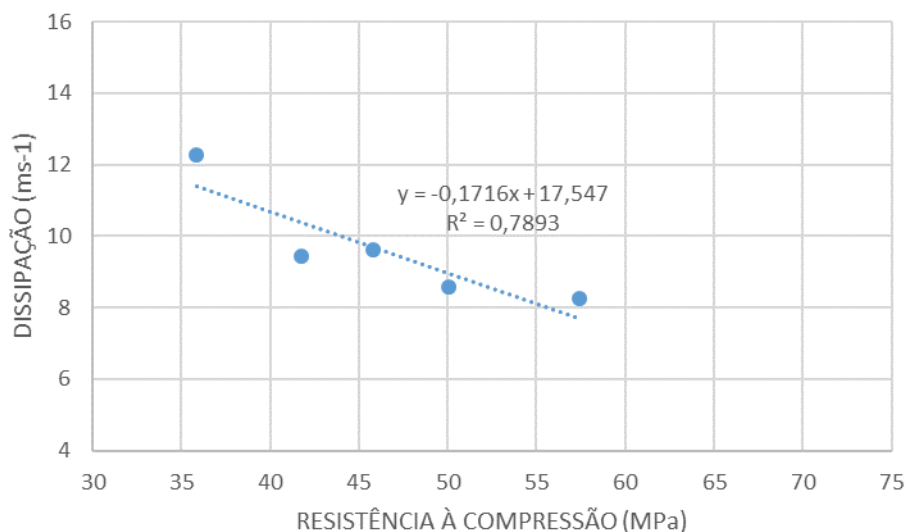
O parâmetro ATME foi o único parâmetro difuso analisado que apresentou comportamento estatisticamente diferente com o avanço da idade do concreto entre os formatos de corpo de prova analisados. Diante disso, se faz necessário novas pesquisas para verificar a real influência da evolução da idade do concreto no ATME.

### 5.3.2 Correlação dos parâmetros difusos com a resistência à compressão

Considerando que a evolução da idade do concreto apresentou influência apenas no parâmetro da dissipação para ambos os formatos de corpo de prova analisados, as médias deste parâmetro foram relacionadas com os respectivos resultados do ensaio de resistência à compressão, para cada lote.

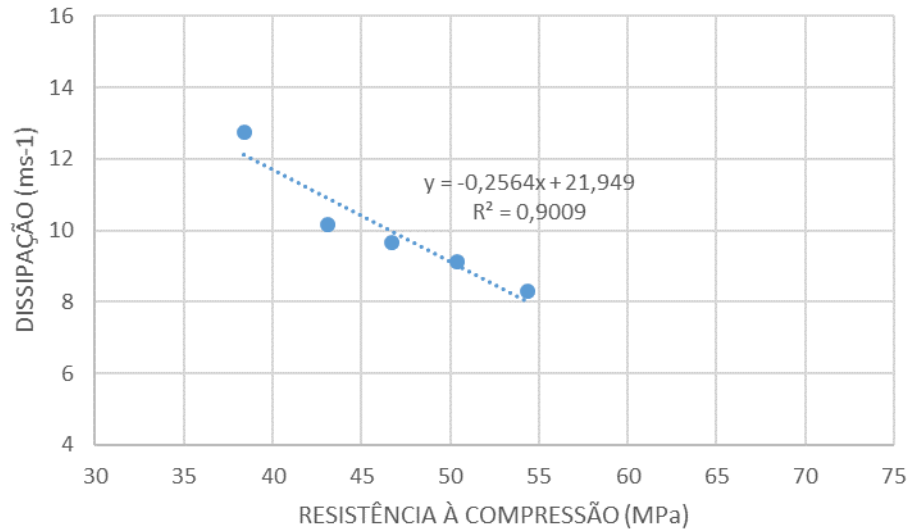
Na Figura 52 e Figura 53, estão apresentados os gráficos para os Lotes PL-1 e PL-2, respectivamente, com dados obtidos nas idades de 1, 2, 3, 7 e 28 dias. Na Figura 54 está apresentado o gráfico do Lote PR-1 com os dados obtidos nas idades de 1, 7 e 91 dias.

Figura 52 - Gráfico Dissipação x Resistência à Compressão dos resultados do Lote PL-1.



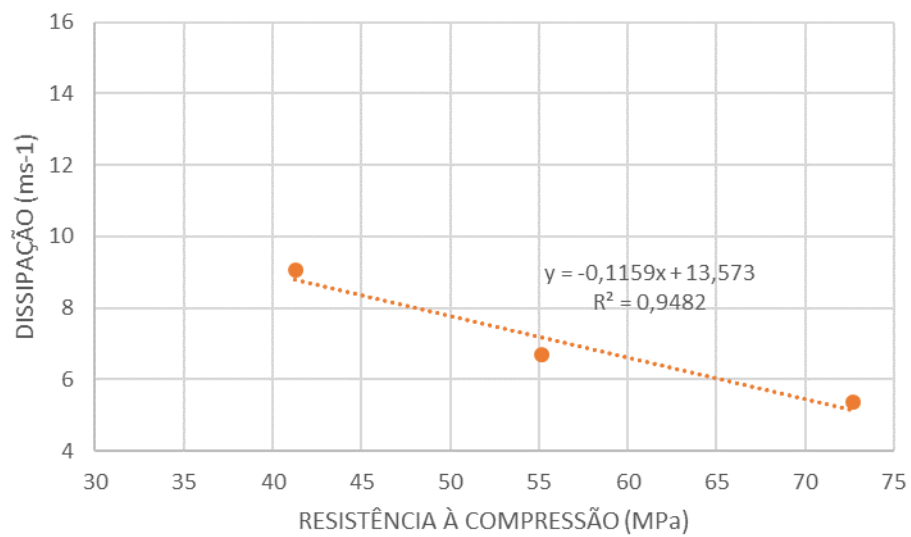
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 53 - Gráfico Dissipação x Resistência à Compressão dos resultados do Lote PL-2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 54 - Gráfico Dissipação x Resistência à Compressão dos resultados do Lote PR-1.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Ao avaliar o comportamento dos dados nos gráficos, pode ser constatado que o parâmetro da dissipação diminuiu gradativamente com o aumento da resistência à compressão, indicando que as variáveis são inversamente proporcionais. Para todas as análises, os valores de R-quadrado foram considerados altos, apresentando em alguns casos valores superiores a 0,90 (valor próximo a 1). Valores de R-quadrado próximos a um indicam boa adesão da linha de tendência ao comportamento dos resultados.

Com isso, pode-se concluir que a dissipação apresentou boa correlação com a resistência à compressão do concreto, considerando as características de ensaio e análise da presente pesquisa. No entanto, se faz necessária a realização de maiores pesquisas com diferentes configurações para verificar esta correlação.

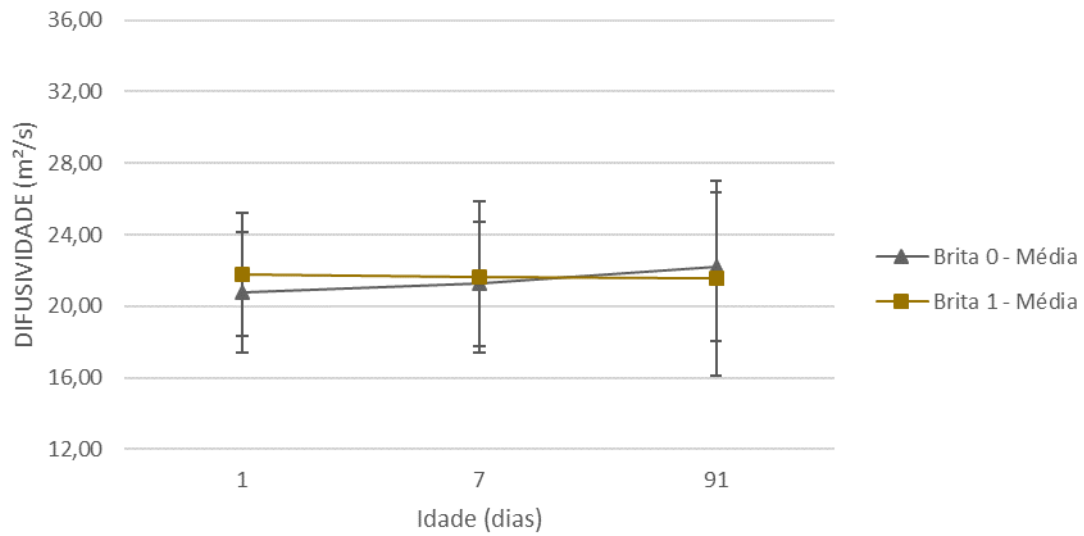
### **5.3.3 Verificação da influência da dimensão do agregado graúdo**

Para verificar a influência da dimensão do agregado graúdo, foram avaliadas as leituras nas idades de 1, 7 e 91 dias nos Lotes PR-1 e PR-2. Destaca-se que a avaliação da dimensão do agregado graúdo na presente pesquisa teve o objetivo de verificar agregados comumente utilizados na construção civil na região. Esses agregados são considerados da mesma ordem de grandeza do comprimento da onda ultrassônica aplicada na pesquisa, no entanto com dimensões inferiores e superiores.

O comprimento médio das ondas analisadas foi de aproximadamente 1,7 cm, ou seja, inferior ao DMC da Brita 1 e superior ao DMC da Brita 0. Considerando que as análises dos parâmetros difusos apresentam bons resultados apenas quando o elemento dispersor é maior que o comprimento de onda, seria de se esperar que os parâmetros difusos não apresentassem resultados satisfatórios na mistura com Brita 0. No entanto, com a utilização das duas dimensões de britas foi possível certificar a realização de uma análise coerente considerando o comprimento da onda em relação a dimensão das diferentes heterogeneidades comparadas. Ressalta-se que não há estudos no meio acadêmico que verifiquem a influência de agregados graúdos como elemento dispersor nos parâmetros difusos, independentemente da dimensão em relação ao comprimento de onda.

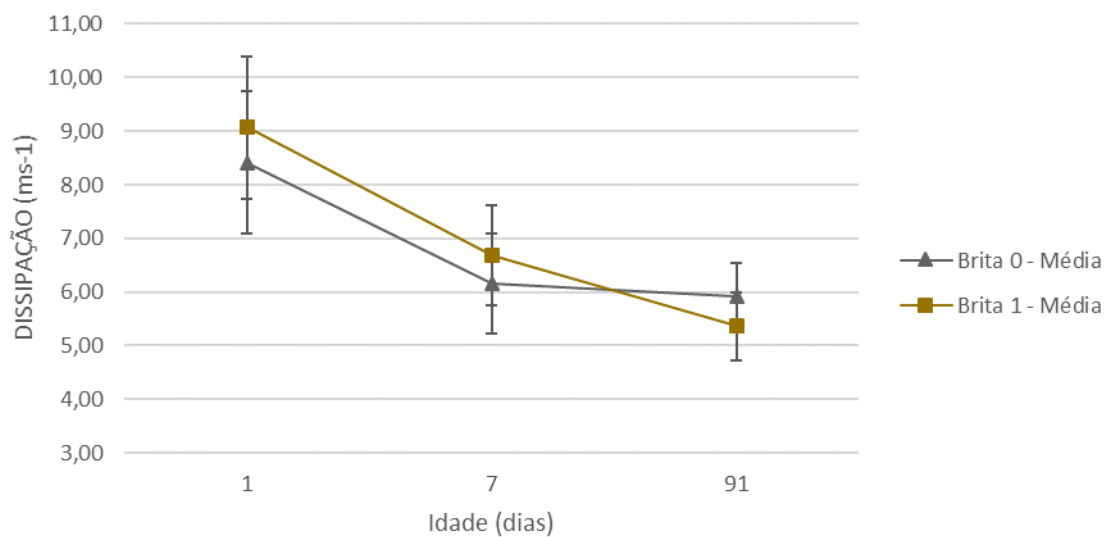
Na Figura 55 a Figura 57 é possível observar, respectivamente, os gráficos com resultados obtidos para o parâmetro da difusividade, dissipação e ATME para as idades e agregados graúdos analisados.

Figura 55 - Resultados médios por tipo de brita para o parâmetro da difusividade, com a média das posições – Lotes PR.



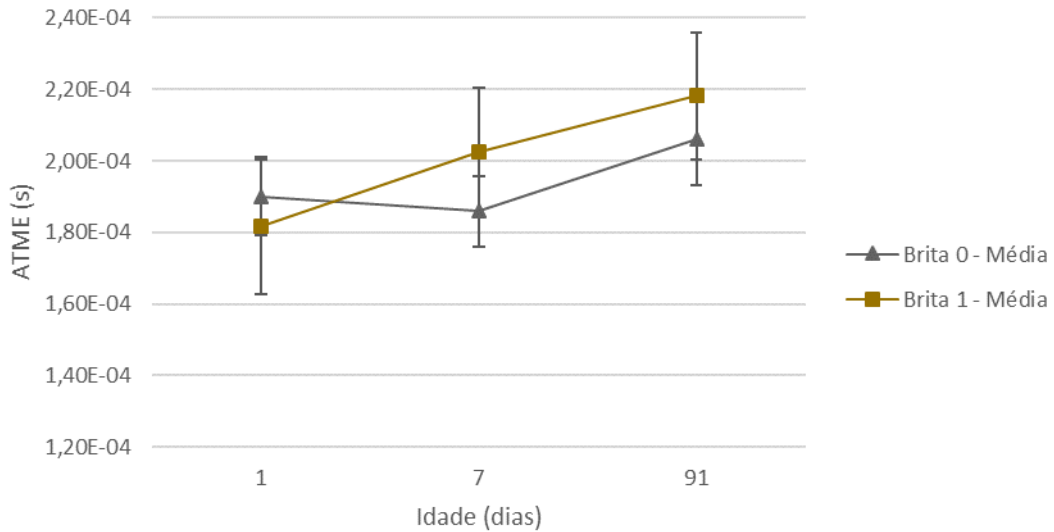
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 56 - Resultados médios por tipo de brita para o parâmetro da dissipação, com a média das posições – Lotes PR.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 57 - Resultados médios por tipo de brita para o parâmetro do ATME, com a média das posições – Lotes PR.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Graficamente, para o parâmetro da difusividade, não houve variações significativas entre os traços analisados, indicando que a difusividade não foi sensível as alterações da dimensão do agregado graúdo. Em relação à dissipação, foi possível perceber uma diferença mais expressiva entre os dois traços analisados, quando comparado com o parâmetro da difusividade, indicando uma probabilidade maior do parâmetro da dissipação ser influenciado pela dimensão do agregado graúdo. O ATME, assim como a dissipação, apresentou uma possível influência do diâmetro do agregado, principalmente nas idades de 7 e 91 dias.

Para verificar se o diâmetro do agregado graúdo influenciou nos parâmetros difusos, ao considerar a mesma idade, foi realizada análise de comparação de médias pelo Teste T. Na Tabela 59 estão apresentados os resultados de média, desvio padrão e coeficiente de variação para cada agregado graúdo, por parâmetro e idade. Ainda, estão apresentados os resultados de P-valores obtidos para cada análise.

Para o parâmetro da difusividade, os resultados do Teste T comprovam a análise gráfica, indicando a não influência da dimensão do agregado graúdo, uma vez que os p-valores foram superiores ao nível de significância (0,05) em todas as idades analisadas.

Na análise da dissipação e ATME, os resultados do Teste T indicaram que para a idade de 1 dia, a dimensão do agregado graúdo não influenciou nos resultados dos respectivos parâmetros. No entanto, para as idades de 7 e 91 dias, houve influência da dimensão do agregado, com p-valores inferiores ao nível de significância.

Tabela 59 – Resultados de influência da dimensão do agregado graúdo.

IDADE	Difusividade ( $m^2/s$ )		Dissipação ( $ms^{-1}$ )		ATME (s)		
	Brita 0	Brita 1	Brita 0	Brita 1	Brita 0	Brita 1	
1 dia	Média	20,794	21,755	8,416	9,058	1,90E-04	1,82E-04
	Desvio Padrão	2,792	3,106	0,869	1,591	1,10E-05	1,90E-05
	C.V. (%)	13,425	14,278	10,327	17,562	5,805	10,452
	P-valor Teste T	0,367		0,172		0,073	
7 dias	Média	20,561	21,631	6,153	6,681	1,86E-04	2,02E-04
	Desvio Padrão	1,400	3,411	0,238	0,889	6,86E-06	1,82E-05
	C.V. (%)	6,811	15,771	3,866	13,302	3,690	8,993
	P-valor Teste T	0,275		<0,01		<0,01	
91 dias	Média	20,970	21,560	5,984	5,361	2,06E-04	2,18E-04
	Desvio Padrão	1,371	2,747	0,352	0,445	5,55E-06	1,77E-05
	C.V. (%)	6,538	12,742	5,881	8,295	2,690	8,108
	P-valor Teste T	0,179		<0,01		<0,01	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Apesar da dissipação estar relacionada a matriz viscoelástica do material, Philippidis e Aggelis (2005) e Ramaniraka *et al.* (2019) correlacionaram a absorção da onda com a zona interfacial pasta-agregado. Ao considerar o concreto com Brita 1, a heterogeneidade do concreto é maior que em relação a Brita 0 e, com isso, a zona de transição pasta-agregado pode ser mais expressiva.

Em relação ao ATME, é válido destacar que o ATME depende dos parâmetros difusividade e dissipação, uma vez que diminui com o aumento dos valores de ambos os parâmetros (QUIVIGER *et al.*, 2012). Considerando os resultados obtidos na presente pesquisa, em que a dissipação apresentou alterações, era esperado que o ATME demonstrasse variações no decorrer das análises.

Com isso, pode-se concluir que, assim como esperado pela literatura, dimensões diferentes de agregados graúdos impactaram nos parâmetros difusos em idades a partir dos 7 dias, considerando as características da presente pesquisa. Como o monitoramento de estruturas acontecem em idades mais avançadas, se faz necessário o cuidado com o traço do concreto em relação a dimensão do agregado para evitar comparação entre estruturas com heterogeneidades diferentes. No entanto, é importante destacar que pela teoria do ultrassom difuso, a brita 0 não é considerada um elemento dispersor. Com isso, as diferenças obtidas podem ser representativas da comparação de um corpo de prova com elemento dispersor e outro sem.

Ressalta-se que as conclusões obtidas são válidas apenas para as características de ensaio e análise da presente pesquisa, sendo necessária a realização de novas pesquisas, sobretudo com transdutores de maior frequência e elementos dispersores maiores, para verificar tais premissas.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos da presente dissertação foram baseados na aplicação do método da difusão ultrassônica para avaliar a sensibilidade dos parâmetros difusos na caracterização de misturas de concreto. Para isso, foram realizadas análises individuais dos parâmetros difusividade, dissipação e ATME para verificar influências em relação ao método de ensaio para obtenção dos parâmetros difusos em um corpo de prova e nas análises dos parâmetros difusos considerando influências do concreto como material de propagação da onda ultrassônica.

As análises relacionadas ao método de ensaio em corpo de prova foram referentes à geometria e consistiram na verificação da influência da geometria de corpos de prova, influência do posicionamento dos transdutores em relação à distância da borda em placas de concreto e na verificação da diferença entre soluções analíticas em corpos de prova prismáticos. Com relação às análises dos parâmetros difusos, foram realizadas verificações considerando influências do material. Para isso, primeiramente foi verificada a influência da idade do concreto após o endurecimento. Com a determinação dos parâmetros sensíveis ao avanço da idade do concreto, foi realizada a comparação destes parâmetros com a evolução da resistência à compressão de concretos. Por fim, foi verificada a influência da dimensão do agregado graúdo em corpos de prova prismáticos.

Para a realização do monitoramento ultrassônico, inicialmente foi determinado o número de repetições de acoplamento dos transdutores e leituras ultrassônicas para garantir confiabilidade estatística nos dados obtidos, considerando características intrínsecas a presente pesquisa. Com isso, foi concluído que seria necessário realizar sete repetições de acoplamento com a obtenção de dez leituras por acoplamento, em cada posição analisada. As análises dos resultados foram realizadas com a média das setenta ondas, por posição, em cada idade. Com a média das posições foram realizadas as verificações propostas, por análises gráficas e testes estatísticos.

Com base em todas as análises apresentadas, foi possível obter conclusões considerando as influências relacionadas à geometria do corpo de prova e ao material.

## 6.1 COM RELAÇÃO AO MÉTODO DE ENSAIO PARA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DIFUSOS EM UM CORPO DE PROVA

### 6.1.1 Variabilidade das medições ultrassônicas na placa de concreto e verificação da influência da distância da borda

Ao realizar leituras por toda a extensão do corpo de prova, foi possível concluir a necessidade de obtenção de dados em mais de uma posição para garantir a correta caracterização das amostras de concreto, uma vez que posições distintas apresentaram parâmetros difusos distintos. Devido à variabilidade dos parâmetros, não foi considerado plausível determinar limites de valores para os parâmetros difusos em estruturas sãs para futuras aplicações práticas.

Outra conclusão importante foi em relação a influência de forma aleatória do número de posições na variabilidade dos parâmetros difusos. Apesar do número de posições avaliadas em cada idade ter aumentado com o avanço do tempo, as variações obtidas pelos parâmetros difusos não foram influenciadas pelo número de posições e/ou idade do concreto.

Ainda, ao verificar a influência do posicionamento do transdutor em relação a borda, foi possível concluir que a partir de 5 cm (valor superior ao caminho livre médio estimado) o distanciamento não interferiu nos resultados obtidos para os parâmetros difusos. Com isso, foi constatado que o posicionamento dos transdutores a distâncias das bordas superiores a 2,8 vezes o comprimento da onda foram suficientes para a atenuação da onda ultrassônica até o final da amostra.

### 6.1.2 Influência da geometria de corpos de prova

Avaliando a comparação entre diferentes formatos de corpo de prova, foi possível concluir que a geometria do corpo de prova influenciou nos resultados dos parâmetros difusos. No entanto, é válido ressaltar que a dimensão da amostra não influenciou no coeficiente de variação dos parâmetros difusos analisados, considerando as características intrínsecas a presente pesquisa.

Ainda na análise da geometria do corpo de prova, foi possível constatar a não influência da face de captação da onda ultrassônica em corpos de prova prismáticos nos parâmetros difusos.

Com base na influência da geometria do corpo de prova, pode-se concluir que os resultados obtidos para os parâmetros difusos são intrínsecos às características de ensaio específicas. Ou seja, resultados obtidos em uma pesquisa não podem ser generalizados para comparação com as demais e para aplicações práticas. As conclusões que devem ser levadas em consideração nos resultados obtidos nas pesquisas da literatura científica são relacionadas apenas ao comportamento dos parâmetros difusos e não a faixas de valores.

### **6.1.3 Verificação da diferença entre soluções analíticas em corpos de prova prismáticos**

Com a avaliação da diferença entre soluções analíticas foi possível concluir que todas as soluções analíticas analisadas foram capazes de determinar os parâmetros difusos em corpos de prova prismáticos. No entanto, em relação aos parâmetros de difusividade e dissipação, nas idades mais avançadas, todas as soluções analíticas resultaram em valores estatisticamente diferentes entre si, com diminuição dos valores dos parâmetros com o aumento do número de direções consideradas influentes. Com isso, pode-se concluir que apesar da viabilidade de aplicação das várias soluções analíticas na determinação dos parâmetros difusos, os resultados obtidos por soluções distintas não podem ser comparados entre si.

## **6.2 COM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DIFUSOS, CONSIDERANDO INFLUÊNCIAS DO MATERIAL**

### **6.2.1 Influência da idade do concreto, após o endurecimento**

Ao realizar o monitoramento ultrassônico para verificação da influência da idade do concreto nos parâmetros difusos, após o endurecimento, foi possível concluir que apenas o parâmetro da dissipação foi influenciado pelo avanço da idade do concreto. O parâmetro ATME apresentou sensibilidade ao avanço da idade do concreto apenas nos corpos de prova prismáticos.

## **6.2.2 Comparação da evolução dos parâmetros difusos com a evolução da resistência à compressão de concretos**

A partir da diferença obtida para a dissipação com o avanço da idade do concreto, ao correlacionar os dados do parâmetro difuso com a resistência à compressão do concreto, foi possível concluir a boa correlação entre os dados. Essa constatação confirma a sensibilidade da dissipação às alterações ocorridas no concreto com o avanço da idade, que também são responsáveis pelo aumento da resistência à compressão.

## **6.2.3 Influência da dimensão do agregado graúdo**

Para finalizar as análises relacionadas aos parâmetros difusos, constatou-se que o agregado graúdo influenciou os parâmetros difusos, comprovando a teoria difundida de Becker, Jacobs e Qu (2003). A influência do agregado graúdo no parâmetro da dissipação pode estar relacionada a absorção da onda na zona interfacial pasta-agregado. No entanto, é válido ressaltar que, apesar de ser da mesma ordem de grandeza, a brita de dimensão menor que o comprimento de onda utilizada na presente pesquisa pode não ter ocasionado o comportamento difuso esperado, implicando na não influência da dimensão do agregado no parâmetro da difusividade.

## **6.3 APLICAÇÕES PRÁTICAS**

A partir das conclusões obtidas na presente pesquisa, foi possível constatar tópicos relevantes para aplicações práticas de monitoramento de ultrassom em estruturas de concreto, considerando o método da difusão ultrassônica. Diante disso, foram destacadas algumas dessas conclusões.

Considerando a comparação entre diferentes formatos de corpo de prova, a comprovação de influência da geometria nos parâmetros difusos inviabiliza a concretagem de corpos de prova de tamanho reduzido para serem utilizados como amostras de comparação de material íntegro nas inspeções de estruturas, considerando análises com os parâmetros de dissipação e ATME. Ainda, a não influência da face de captação da onda em corpos de prova prismáticos nos parâmetros difusos pode ser considerada um facilitador em inspeções

estruturais, uma vez que leituras realizadas em diversas posições na face mais favorável para a realização do ensaio de ultrassom poderão caracterizar a estrutura como um todo.

Em relação a constatação da influência da idade, é inviável a realização de ensaios ultrassônicos nos primeiros dias de idade do concreto para obtenção de valores de comparação de material íntegro, considerando análises com os parâmetros de dissipação e ATME. No entanto, a igualdade dos parâmetros difusos nas análises obtida entre as idades de 28 e 135 dias indica que, apesar da constatação da influência do avanço da idade, em concretos mais maduros a idade pode não ser um fator de influência. Ou seja, em inspeções anuais por toda a vida útil da estrutura, diferenças entre parâmetros difusos poderão indicar apenas anomalias no concreto e não uma influência do avanço da idade.

Quanto a sensibilidade dos parâmetros difusos à dimensão do agregado graúdo, é necessário o cuidado com o traço do concreto estudado em relação a dimensão do agregado para evitar comparação entre estruturas com heterogeneidades diferentes. Ressalta-se que as conclusões obtidas se basearam nas configurações de ensaio, corpos de prova e traços intrínsecos à presente pesquisa.

#### 6.4 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Considerando a presente pesquisa como um primeiro estudo em relação as influências geométricas e do concreto como material em estruturas sãs nos parâmetros da difusividade ultrassônica, se faz necessária a realização de estudos diversificados e mais aprofundados para consolidação do comportamento esperado pela difusividade, dissipação e ATME e confirmação das conclusões obtidas. Diante disso, para as pesquisas futuras, sugere-se:

- a) Realizar ensaios com transdutores de maior frequência, com o objetivo de diminuir o comprimento de onda  $e$ , com isso, aumentar a sensibilidade dos parâmetros às heterogeneidades presentes no concreto;
- b) Realizar ensaios ultrassônicos com corpos de provas de outros formatos e dimensões, de maneira a confirmar a variabilidade dos parâmetros difusos, influência da geometria e a não influência do aumento da distância da borda;
- c) Realizar ensaios ultrassônicos em corpos de prova produzidos com diferentes traços, de maneira a confirmar a variabilidade dos parâmetros difusos, influência da geometria e a não influência do aumento da distância da borda;

- d) Verificar o comportamento dos parâmetros difusos com o avanço da idade do concreto em misturas cimentícias com diferentes traços, incluindo alterações na relação água/cimento e dimensão e quantidade de agregado graúdo;
- e) Verificar o comportamento dos parâmetros difusos em relação a diferentes adições ao concreto, como fibras metálicas, fibras de polipropileno e outras;
- f) Realizar análises com outros códigos para obtenção dos parâmetros difusos, com o objetivo de diminuir a variabilidade dos dados, sem perder a confiança estatística;
- g) Realizar análises com soluções analíticas distintas em corpos de prova de diferentes formatos, para verificar possíveis restrições de aplicação das soluções.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802** - Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, p. 15, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de Prova. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008. 7 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

AGGELIS, D. G.; SHIOTANI, T. Surface wave dispersion in cement-based media: Inclusion size effect. **NDT and E International**, v. 41, n. 5, p. 319–325, 2008.

AHN, E.; SHIN, M.; POPOVICS, J. S.; WEAVER, R. L. Effectiveness of diffuse ultrasound for evaluation of micro-cracking damage in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105862, 2019.

AÏTCIN, P. C.; FLATT, R. J. **Science and technology of concrete admixtures**. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. 617 p.

AMADIO, A. P. Determinação das faixas de velocidade ultrassônica superficial em concreto. 2018. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2018.

ANDREUCCI, R. Ensaio por ultrassom. **ABNDI - Associação Brasileira Ensaios Não Destrutivos e Inspeção**, v. 1, p. 1–102, 2018.

ANUGONDA, P.; WIEHN, J. S.; TURNER, J. A. Diffusion of ultrasound in concrete. **Ultrasonics**, v. 39, n. 6, p. 429–435, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 597-16**. ASTM C597 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM International, p. 4, 2016.

BALAYSSAC, Jean-Paul; GARNIER, Vincent (Ed.). **Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures**. Elsevier, 2017.

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

BRESSAN, H. F. G. **Estudo do comportamento de ondas ultrassônicas no monitoramento do concreto em idades iniciais**. 2019. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019

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

CAMARA. **Estudo do efeito da variação de pressão de acoplamento no comportamento dos parâmetros ultrassônicos**. 2017. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CÂMARA, E. **Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizados na Grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos**. 2006. 212 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

CHOTARD, T.; GIMET-BREART, N.; SMITH, A.; et al. Application of ultrasonic testing to describe the hydration of calcium aluminate cement at the early age. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 3, p. 405–412, 2001.

DALLY, J.W.; RILEY, W.F. **Experimental Stress Analysis**. 1991.

DERAEMAEKER, A.; DUMOULIN, C. Embedding ultrasonic transducers in concrete: A lifelong monitoring technology. **Construction and Building Materials**, v. 194, p. 42–50, 2019.

DEROO, F.; KIM, J.-Y.; QU, J.; SABRA, K.; JACOBS, L. J. Detection of damage in concrete using diffuse ultrasound. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 127, n. 6, p. 3315–3318, 2010.

GÜÇLÜER, Kadir. Investigation of the effects of aggregate textural properties on compressive strength (CS) and ultrasonic pulse velocity (UPV) of concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 27, p. 100949, 2020.

HE, Y., ZHANG, X., SHUI, L., WANG, Y., GU, M., WANG, X., WANG, H., PENG, L., "Effects of PCEs with various carboxylic densities and functional groups on the fluidity and hydration performances of cement pastes", **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 656-668, 2019

IN, C. W.; ARNE, K.; KIM, J. Y.; KURTIS, K. E.; JACOBS, L. J. Estimation of Crack Depth in Concrete Using Diffuse Ultrasound: Validation in Cracked Concrete Beams. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 36, n. 1, p. 1–9, 2016.

IN, C. W.; HOLLAND, R. B.; KIM, J. Y.; et al. Monitoring and evaluation of self-healing in concrete using diffuse ultrasound. **NDT and E International**, v. 57, p. 36–44, 2013.



JABOCS, L.J.; OWINO, J.O. Effect of aggregate size on attenuation of rayleigh surface waves in cement-based materials. **Manager**, v. 126, n. 11, p. 167–170, 2000.

JIANG, H.; ZHAN, H.; ZHANG, J.; JIANG, R. Diffusion Coefficient Estimation and Its Application in Interior Change Evaluation of Full-Size Reinforced Concrete Structures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 3, p. 1-10, 2019.

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

MARTINS, P. P. M. **Avaliação do preenchimento com sistema epóxi de fendas induzidas em estruturas de concreto utilizando o método de difusão da energia de ondas ultrassônicas**. 2019. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

MEDEIROS, A. **Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado**. 2007. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

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

PAYAN, C.; ABRAHAM, O.; GARNIER, V. Ultrasonic Methods. **Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures**, p. 21–85, 2018.

PHILIPPIDIS, T. P.; AGGELIS, D. G. Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. **Ultrasonics**, v. 43, n. 7, p. 584–595, 2005.

PIQUE, T. M.; VAZQUEZ, A.; TOLEDO FILHO, R. D. Use of simple non-destructive techniques to evaluate the hydration reactions of PVA-modified cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 340–347, 2017.

PLANÈS, T.; LAROSE, E. A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 53, p. 248–255, 2013.

PROCEQ. **Pundit Lab**: Instruções operacionais. Suíça: Proceq SA, 2017.

PUNURAI, W.; JARZYNSKI, J.; QU, J.; KURTIS, K. E.; JACOBS, L. J. Characterization of dissipation losses in cement paste with diffuse ultrasound. **Mechanics Research Communications**, v. 34, n. 3, p. 289–294, 2007.

QUIVIGER, A.; PAYAN, C.; CHAIX, J. F.; GARNIER, V.; SALIN, J. Effect of the presence and size of a real macro-crack on diffuse ultrasound in concrete. **NDT and E International**, v. 45, n. 1, p. 128–132, 2012.

RAMAMOORTHY, S. K.; KANE, Y.; TURNER, J. A. Ultrasound diffusion for crack depth determination in concrete. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 115, n. 2, p. 523–529, 2004.

RAMANIRAKA, M.; RAKOTONARIVO, S.; PAYAN, C.; GARNIER, V. Effect of the Interfacial Transition Zone on ultrasonic wave attenuation and velocity in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 124, n. July, p. 105809, 2019.

REINHARDT, H. W.; GROSSE, C. U.; HERB, A. T. Ultrasonic monitoring of setting and hardening of cement mortar—A new device. **Materials and Structures**, v. 33, n. 9, p. 581–583, 2000.

RESENDE, R. M. L. G. **Avaliação dos efeitos da danificação e da acustoelasticidade sobre a velocidade de pulso ultrassônico em corpos de prova de concreto submetidos a compressão uniaxial**. 2018. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SCHICKERT, M.; KRAUSE, M. Ultrasonic techniques for evaluation of reinforced concrete structures. **Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures: Non-Destructive Testing Methods**, p. 490–530, 2010.

SCHURR, Dennis P. et al. Damage detection in concrete using coda wave interferometry. **Ndt & E International**, v. 44, n. 8, p. 728–735, 2011.

SEHER, M.; IN, C. W.; KIM, J. Y.; KURTIS, K. E.; JACOBS, L. J. Numerical and experimental study of crack depth measurement in concrete using diffuse ultrasound. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 32, n. 1, p. 81–92, 2013.

SHENG, P. **Introduction to wave scattering, localization and mesoscopic phenomena**. Springer Science & Business Media, 2006.

SILVA, P. M. **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 em Engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SINGH, R. Ultrasonic Testing. **Applied Welding Engineering**, p. 343–355, 2016.

SOUZA, F. C. **Avaliação do preenchimento com sistema epóxi de fendas induzidas em estruturas de concreto pela análise do sinal ultrassônico**. 2017. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

TINOCO, I. **Avaliação da perda de rigidez de vigas de concreto armado utilizando o método de difusão da energia de ondas ultrassônicas**. 2019. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

TINOCO, I. V.; PINTO, R. C. A. Evaluation of stiffness loss of reinforced concrete beams using the diffuse ultrasound method. **Ultrasonics**, v.117, 2021.

- TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**, 7<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- TRTNIK, G.; GAMS, M. Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages. **Ultrasonics**, v. 54, n. 1, p. 66–75, 2014.
- WEAVER, R. Ultrasonics in an aluminum foam. **Ultrasonics**, v. 36, n. 1–5, p. 435–442, 1998.
- WEAVER, R. L.; SACHSE, W. Diffusion of ultrasound in a glass bead slurry. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 97, n. 4, p. 2094–2102, 1995.
- YE, G.; LURA, P.; VAN BREUGEL, K.; FRAAIJ, A. L. A. Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 491–497, 2004.
- YIM, H. J.; AN, Y. K.; KIM, J. H. Water depercolation of setting cement paste evaluated by diffuse ultrasound. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 10–19, 2016.
- YOO, D. Y.; SHIN, H. O.; YOON, Y. S. Ultrasonic monitoring of setting and strength development of ultra-high-performance concrete. **Materials**, v. 9, n. 4, 2016.
- ZHAN, H.; JIANG, H.; JIANG, R. Three-dimensional images generated from diffuse ultrasound wave: detections of multiple cracks in concrete structures. **Structural Health Monitoring**, 2019.
- ZHANG, Y.; ABRAHAM, O.; TOURNAT, V.; et al. Validation of a thermal bias control technique for Coda Wave Interferometry (CWI). **Ultrasonics**, v. 53, n. 3, p. 658–664, 2013.

## **APÊNDICE A – Ensaio preliminar: Determinação do número de acoplamentos e leituras**

Com o objetivo de aumentar a confiabilidade estatística nas análises do presente trabalho, realizou-se um estudo para verificar o número de acoplamentos e leituras a serem repetidos em cada posição e idade, para uma confiança estatística de 90%. A fim de esclarecimento, considera-se número de acoplamentos como sendo o número de vezes que os transdutores foram retirados e acoplados novamente na mesma posição e número de leituras, o número de ondas ultrassônicas captadas em cada acoplamento.

A determinação da confiabilidade estatística de 90%, ou seja, tolerância de 10%, se deu em função da viabilidade de desenvolvimento dos ensaios ultrassônicos. Confiabilidades superiores acarretariam em maiores repetições de dados por posição, o que demandaria mais tempo de realização do ensaio ultrassônico e inviabilizaria a obtenção de resultados necessários para atingir todos os objetivos propostos na presente pesquisa. Assim como confiabilidades menores implicariam em um número pequeno de repetições em comparação com as apresentadas na literatura científica.

Para isso, foi realizado um ensaio preliminar em um corpo de prova de concreto de seção 30 cm x 35 cm e comprimento de 100 cm, após 28 dias da idade. O concreto utilizado para moldagem tinha traço 1,00; 1,68; 0,72; 2,79, respectivamente: cimento Portland CP V-ARI, areia de britagem, areia natural, brita 0 e 5% de aditivo superplastificante. A relação água/cimento utilizada foi de 0,55 e o concreto atingiu a resistência à compressão de 45,2 MPa aos 28 dias.

Utilizando o equipamento de ultrassom e os transdutores detalhados na metodologia proposta, em uma mesma posição foram realizados nove acoplamentos, com a realização de dez leituras por acoplamento. Com isso, foi obtido um total de 90 ondas ultrassônicas. A aquisição foi realizada no centro da face de 30 cm x 100 cm do corpo de prova, com modo de transmissão indireto e espaçamento entre os transdutores de 20 cm, para manter os mesmos padrões empregados nesta pesquisa. A pressão de acoplamento dos transdutores foi realizada manualmente, com pressão moderadamente variável. Os parâmetros de entrada para obtenção dos sinais foram definidos como amplitude da tensão de excitação de 500 V, ganho no sinal recebido de 50x e período de tempo de captura do sinal ultrassônico de 10 ms.

As análises foram realizadas com os parâmetros de difusividade e dissipação, uma vez que esses são os parâmetros mais difundidos na literatura científica sobre o método da difusão,

com base para comparação com outros autores. Conforme apresentado na metodologia do processamento dos sinais ultrassônicos, foram obtidos os parâmetros de dissipação e difusividade através do código desenvolvido por Martins (2019) e Tinoco (2019) para a solução analítica no domínio bidimensional infinito, mesma solução utilizada na presente pesquisa e que representa o corpo de prova analisado. Para a determinação da densidade espectral de energia experimental foram adotados  $\Delta t = 32 \mu s$ ,  $\Delta f = 400 \text{ kHz}$  e  $f_c = 200 \text{ kHz}$ .

Após a obtenção dos parâmetros do método da difusão, verificou-se através de análises estatísticas o número mínimo de acoplamentos e de leituras ultrassônicas para se obter um grau de confiança de 90%. A análise do número de acoplamentos foi realizada com os valores médios das dez leituras de cada acoplamento, para verificar quantas vezes os transdutores (emissor e receptor) necessitariam ser retirados e recolocados na mesma posição. A determinação do número de leituras por acoplamento, com base nas dez leituras de cada acoplamento, sendo realizada uma análise estatística para cada um dos nove acoplamentos.

Baseando-se em Dally e Riley (1991), os números mínimos ( $n$ ) de repetições foram determinados a partir da Equação A.1.

$$n = \left[ \frac{t(\alpha)S_x}{\alpha\bar{x}} \right]^2 \quad \text{A.1}$$

Onde:

$t(\alpha)$  é o valor t da distribuição t de Student para um grau de liberdade  $gl$  e tolerância  $\alpha$ ;

$S_x$  é o desvio padrão da amostra piloto analisada;

$\alpha$  é a tolerância;

$\bar{x}$  é a média da amostra piloto analisada.

O valor  $t(\alpha)$  foi obtido pela função “INVT” do Excel, com dados de entrada de tolerância  $\alpha$  e grau de liberdade  $gl$ . Ressalta-se que o grau de liberdade  $gl$  é o número de dados observados subtraído um. O procedimento foi repetido até a conversão de “ $n$ ”. Nos casos em que não houve conversão dos dados, os cálculos foram repetidos quatro vezes e considerou-se “ $n$ ” como sendo o menor número resultante entre as várias repetições de cada análise.

Nas Tabelas A.1 e A.2 estão apresentados, respetivamente, os dados e os resultados estatísticos obtidos na determinação do número mínimo de repetições de acoplamentos, com tolerância de 10%. Com base nesses resultados, constata-se que para um coeficiente de variação

máximo de 8,61%, seria necessário realizar 3 repetições de acoplamento para garantir confiabilidade estatística de 90%. Como o número de repetições calculado foi inferior ao número de repetições realizadas experimentalmente, não houve necessidade do cálculo de novas interações.

Tabela A.1 – Dados para obtenção do número mínimo de repetições de acoplamentos.

<b>Acoplamento</b>	<b>Difusividade (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Dissipação (ms<sup>-1</sup>)</b>
1	33,418	4873,255
2	29,169	5431,746
3	28,647	5364,939
4	26,629	5830,486
5	28,024	5404,446
6	28,287	5684,483
7	27,029	5503,745
8	31,514	5595,966
9	25,436	6625,742
<b>Média</b>	28,68	5590,53
<b>Desv. Padrão</b>	2,47	470,48
<b>C.V (%)</b>	8,61	8,42

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela A.2 – Resultados estatísticos para obtenção do número mínimo de repetições de acoplamentos.

	<b>Difusividade (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Dissipação (ms<sup>-1</sup>)</b>
<b>Tolerância</b>	10,0%	10,0%
<b>n<sub>0</sub></b>	9	9
<b>t<sub>0</sub></b>	1,86	1,86
<b>n<sub>calc1</sub></b>	2,56	2,45
<b>n<sub>1</sub> = n<sub>necessário</sub></b>	3	3

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a determinação do número mínimo de leituras a serem realizadas por acoplamento, foram considerados os dados apresentados na Tabela A.3 e os resultados estatísticos da Tabela A.4 para o parâmetro da difusividade, e das Tabelas A.5 e A.6, para a dissipação.

Tabela A.3 – Dados para obtenção do número mínimo de repetições de leitura por acoplamento para o parâmetro da difusividade ( $m^2/s$ ).

<b>Acoplamento /Leitura</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	41,76	27,42	30,39	26,70	25,63	29,36	29,19	31,07	24,61
<b>2</b>	37,08	29,54	27,73	32,18	28,14	34,03	29,18	29,86	25,01
<b>3</b>	31,47	30,97	27,53	26,40	25,78	29,51	26,74	29,38	24,48
<b>4</b>	34,49	30,96	31,08	28,76	25,99	30,32	27,70	34,50	24,49
<b>5</b>	30,81	25,93	27,84	26,24	29,34	30,94	27,64	34,39	25,80
<b>6</b>	31,39	28,47	27,18	26,24	29,69	28,18	24,47	32,61	24,49
<b>7</b>	33,83	28,72	27,61	26,52	29,03	26,81	26,60	31,56	25,70
<b>8</b>	27,28	29,71	31,20	22,15	30,60	25,39	27,66	29,44	26,97
<b>9</b>	36,20	29,32	28,16	26,40	28,48	22,88	25,79	30,37	25,92
<b>10</b>	29,88	30,64	27,75	24,70	27,57	25,45	25,33	31,95	26,89
<b>Média</b>	33,42	29,17	28,65	26,63	28,02	28,29	27,03	31,51	25,44
<b>Desv. Padrão</b>	4,18	1,61	1,58	2,57	1,75	3,24	1,55	1,88	0,97
<b>C.V (%)</b>	12,50	5,52	5,52	9,66	6,23	11,47	5,75	5,95	3,82

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela A.4 – Resultados estatísticos para obtenção do número mínimo de repetições de leitura por acoplamento para o parâmetro da difusividade ( $m^2/s$ ).

<b>Acoplamento</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>Tolerância</b>	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
<b>n<sub>0</sub></b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>t<sub>0</sub></b>	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83
<b>n<sub>calcul</sub></b>	5,25	1,02	1,02	3,14	1,31	4,42	1,11	1,19	0,49
<b>n<sub>1</sub> = n<sub>necessário</sub></b>	6	2	2	4	2	5	2	2	2

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela A.5 – Dados para obtenção do número mínimo de repetições de leitura por acoplamento para o parâmetro da dissipação ( $ms^{-1}$ ).

<b>Acoplamento /Leitura</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	4185,99	5680,64	5388,36	6050,47	5863,57	5381,62	5594,26	5716,56	6660,72
<b>2</b>	4571,01	5303,56	5498,41	4797,93	5460,00	5163,14	5083,71	5981,68	6610,82
<b>3</b>	5276,05	5150,64	5521,31	6057,30	6536,84	5279,68	5792,21	5550,66	6656,64
<b>4</b>	5332,34	5157,39	5370,11	5698,45	5546,73	5162,99	5127,45	5275,30	6681,69
<b>5</b>	4979,47	6067,48	5531,63	5404,28	5005,48	5457,41	5501,64	5260,47	6746,64
<b>6</b>	4910,58	5731,63	5401,61	5860,68	5276,54	5402,69	5877,51	5405,39	6565,63
<b>7</b>	4628,77	5684,89	5295,40	5448,24	5343,09	6131,72	5738,67	5442,67	6717,35
<b>8</b>	5720,44	5198,32	5123,54	6529,36	5081,43	6178,10	4975,52	6316,41	6379,06
<b>9</b>	4297,97	5282,45	5214,70	6061,25	4969,78	6322,89	5663,53	5612,19	6716,85
<b>10</b>	4829,92	5060,47	5304,32	6396,91	4960,98	6364,60	5682,95	5398,33	6522,01
<b>Média</b>	4873,25	5431,75	5364,94	5830,49	5404,45	5684,48	5503,74	5595,97	6625,74
<b>Desv. Padrão</b>	478,39	334,25	133,89	513,66	492,80	499,35	323,35	333,16	111,59
<b>C.V (%)</b>	9,82	6,15	2,50	8,81	9,12	8,78	5,88	5,95	1,68

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela A.6 – Resultados estatísticos para obtenção do número mínimo de repetições de leitura por acoplamento para o parâmetro da dissipação ( $\text{ms}^{-1}$ ).

<b>Acoplamento</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>Tolerância</b>	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
<b>n<sub>0</sub></b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>t<sub>0</sub></b>	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83
<b>n<sub>calc1</sub></b>	3,24	1,27	0,21	2,61	2,79	2,59	1,16	1,19	0,10
<b>n<sub>1</sub> = n<sub>necessário</sub></b>	4	2	2	3	3	3	2	2	2

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Considerando os dados apresentados, observou-se que o maior número de repetições necessário para confiabilidade de 90% em relação ao parâmetro da difusividade foi igual a seis leituras por acoplamento, correspondente ao maior coeficiente de variação (12,50%). Com referência ao parâmetro da dissipação, seria necessária a realização de quatro leituras por acoplamento, em função do coeficiente de variação do primeiro acoplamento (9,82%).

Como observado na Equação A.1 e nos resultados apresentados, o número de repetições a serem realizadas para acoplamentos e leituras dependem do coeficiente de variação da amostra. Para atingir os objetivos da presente pesquisa, os corpos de prova e os traços de concreto utilizados no trabalho se diferiram do utilizado no ensaio preliminar, o que poderia ocasionar variabilidades diferentes. Diante disso, realizou-se uma pesquisa na literatura científica para verificar coeficientes de variação obtidos por outros autores, com características de amostras e de ensaio variados. Os maiores coeficientes de variação obtidos por Ahn (2019) em 200 repetições de leituras ultrassônicas foram iguais a 12,4% para a difusividade e 9,40% para a dissipação. Martins (2019) encontrou coeficientes de variação máximos iguais a 4,55% para a difusividade e 7,81% para a dissipação em um mesmo acoplamento e iguais a 13,23% e a 6,37%, para difusividade e para dissipação, respectivamente, entre acoplamentos e posições.

Dessa forma, constatou-se que o número de três repetições de acoplamento por posição (considerado necessário para variações máximas de aproximadamente 8,5%), conforme apresentado na Tabela A.2, poderia não ser o suficiente para atingir a confiabilidade dos resultados em amostras com características diferentes. Apesar das diferenças nas formas de obtenção dos dados e análises, foi realizada uma segunda análise estatística, a favor da segurança. Com isso, a nova análise se baseou no maior coeficiente encontrado na literatura, de 13,23% (MARTINS, 2019), considerando a média obtida no presente ensaio, confiabilidade de 90% e desvio padrão correspondente a um coeficiente de variação de 13,50%. O resultado está apresentado na Tabela A.7.



Tabela A.7 – Dados para obtenção do número mínimo de repetições de acoplamentos considerando coeficiente de variação igual a 13,50%.

	<b>DIFUSIVIDADE (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>DISSIPACÃO (ms<sup>-1</sup>)</b>
<b>Média</b>	28,68	5590,53
<b>Desv. Padrão</b>	3,87	754,72
<b>C.V (%)</b>	13,5	13,5
<b>Tolerância</b>	10,0%	10,0%
<b>n<sub>0</sub></b>	9	9
<b>t<sub>0</sub></b>	1,86	1,86
<b>n<sub>calc1</sub></b>	6,30	6,30
<b>n<sub>1</sub> = n<sub>necessário</sub></b>	7	7

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Assim, determinou-se que o número de repetições de acoplamento a serem realizados por posição seria igual a sete. Este valor corresponde a uma confiabilidade de 90% para valores dos parâmetros difusos dos acoplamentos com até 13,50% de variação em relação à média da posição.

Na análise do número de leituras a serem realizadas por acoplamento, observou-se que o maior coeficiente de variação obtido, igual a 12,50%, também foi inferior ao encontrado na literatura. Com isso, o número de leituras mínimo deveria ser semelhante ao número de acoplamentos. Todavia, com a intenção de garantir a confiabilidade estatística necessária e considerando que o tempo para obtenção de cada leitura é demasiadamente inferior ao de cada acoplamento, estipulou-se que o número de leituras realizadas por acoplamento seria igual a dez (valor superior ao mínimo necessário).

Ao realizar simulação de número mínimo de leituras em função do coeficiente de variação, constatou-se que dez repetições correspondem a confiabilidade estatística de 90% para coeficientes de variações de até 17%, considerando as médias obtidas no ensaio realizado. Com isso, confirmou-se que a realização de dez leituras por acoplamento garante a confiabilidade estatística requerida, uma vez que o coeficiente de variação abrangido é superior ao encontrado na literatura científica e nos ensaios preliminares.

Dessa forma, determinou-se que para cada posição, em cada idade, seriam realizadas sete repetições de acoplamento (com retirada e acoplamento dos transdutores na mesma posição) e dez repetições de leituras por acoplamento, para confiabilidade estatística de 90%, totalizando a obtenção de 70 ondas ultrassônicas por posição em cada idade. O número de ondas ultrassônicas determinado foi igual ao número de repetições do impulso de excitação da onda

ultrassônica em cada etapa de carregamento da pesquisa realizada por Zhan, Jiang e Jiang (2019).

## APÊNDICE B – Ensaio de caracterização dos agregados utilizados

Tabela B.1 – Distribuição granulométrica areia de britagem.

Peneira (#)	Amostra 1			Amostra 2		
	Massa retida (kg)	% Retida	% Retida acumulada	Massa retida (kg)	% Retida	% Retida acumulada
<b>6,3</b>	0,0013	0,3%	0,3%	0,0004	0,1%	0,1%
<b>4,75</b>	0,0041	0,8%	1,1%	0,0040	0,8%	0,9%
<b>2,36</b>	0,1031	20,6%	21,7%	0,1050	20,7%	21,6%
<b>1,18</b>	0,1146	22,9%	44,6%	0,1230	24,3%	45,9%
<b>0,60</b>	0,0945	18,9%	63,5%	0,0969	19,1%	65,0%
<b>0,30</b>	0,0689	13,8%	77,3%	0,0648	12,8%	77,8%
<b>0,15</b>	0,0365	7,3%	84,6%	0,0333	6,6%	84,4%
<b>Fundo</b>	0,0772	15,4%	100,0%	0,0790	15,6%	100,0%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela B.2 – Distribuição granulométrica areia natural.

Peneira (#)	Amostra 1			Amostra 2		
	Massa retida (kg)	% Retida	% Retida acumulada	Massa retida (kg)	% Retida	% Retida acumulada
<b>4,75</b>	0,0000	0,0%	0,0%	0,0000	0,0%	0,0%
<b>2,36</b>	0,2600	0,1%	0,1%	0,5000	0,1%	0,1%
<b>1,18</b>	4,0000	0,8%	0,9%	4,5000	0,9%	1,0%
<b>0,60</b>	16,4700	3,3%	4,1%	12,8000	2,6%	3,6%
<b>0,30</b>	50,1300	10,0%	14,1%	43,8000	8,8%	12,3%
<b>0,15</b>	206,5000	41,2%	55,4%	210,1000	42,0%	54,3%
<b>Fundo</b>	223,6000	44,6%	100,0%	228,8000	45,7%	100,0%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela B.3 – Distribuição granulométrica brita 1.

Peneira (#)	Amostra 1			Amostra 2		
	Massa retida (kg)	% Retida	% Retida acumulada	Massa retida (kg)	% Retida	% Retida acumulada
<b>19</b>	0,1044	1,8%	2%	0,1366	2,3%	2%
<b>12,50</b>	3,4891	59,2%	59%	3,3467	57,2%	57%
<b>9,50</b>	1,6970	28,8%	88%	1,4938	25,5%	83%
<b>6,40</b>	0,4380	7,4%	95%	0,4613	7,9%	91%
<b>4,75</b>	0,1474	2,5%	98%	0,2369	4,0%	95%
<b>Fundo</b>	0,1270	2,2%	100%	0,3158	5,4%	100%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela B.4 – Distribuição granulométrica brita 0.

Peneira (#)	Amostra 1			Amostra 2		
	Massa retida (kg)	% Retida	% Retida acumulada	Massa retida (kg)	% Retida	% Retida acumulada
<b>12,50</b>	0,05	1,9%	2%	0,05	2,0%	2%
<b>9,50</b>	0,60	23,9%	26%	0,56	22,6%	25%
<b>6,40</b>	1,00	39,9%	66%	0,92	36,8%	61%
<b>4,75</b>	0,64	25,6%	91%	0,62	24,7%	86%
<b>Fundo</b>	0,22	8,7%	100%	0,35	14,0%	100%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela B.5 – Resultados de diâmetro máximo característico (D.M.C.), módulo de finura (M.F.) e massa específica seca dos agregados utilizados.

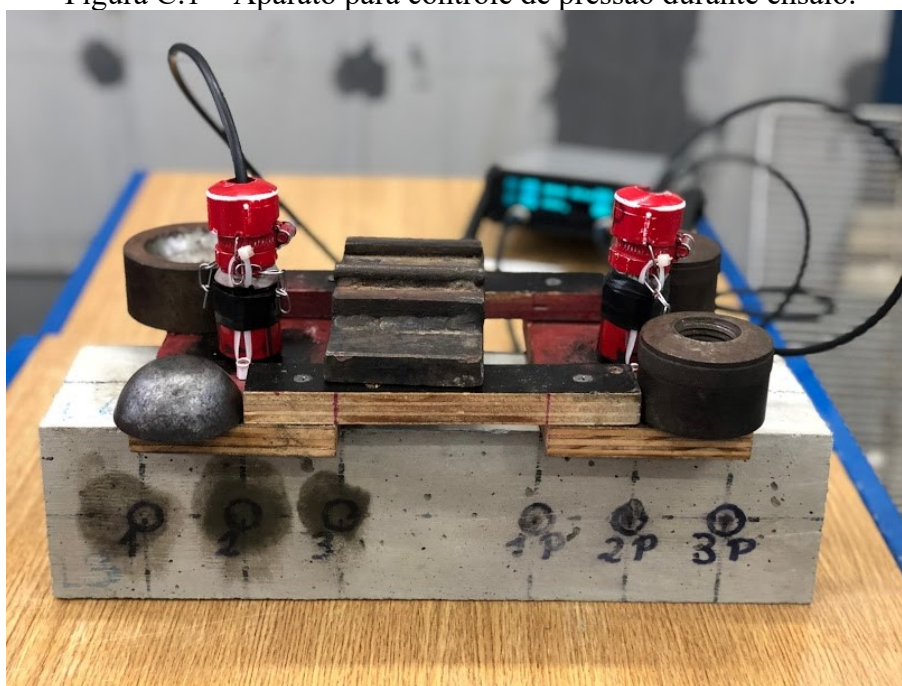
Agregado	D.M.C. (mm)	M.F.	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Areia natural</b>	0,60	0,72900	2,61
<b>Areia de britagem</b>	4,75	2,941595	2,665
<b>Brita 1</b>	19	1,835792	2,67
<b>Brita 0</b>	12,5	1,137969	2,73

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

## APÊNDICE C – Aparato para controle de pressão

O aparato desenvolvido para garantir o controle de pressão em todas os ensaios ultrassônicos deste trabalho foi constituído de uma placa de madeira com ganchos, dois suportes para transdutor com molas e pesos metálicos para garantir a estabilidade do aparato. O funcionamento do aparato foi baseado em um sistema de molas localizadas dentro do suporte para transdutor, as quais eram comprimidas pelo próprio transdutor ao fixar o suporte na placa de madeira utilizando abraçadeiras de nylon e ganchos. Ao realizar o encaixe, o transdutor comprimia as molas, que geravam uma pressão contrária e constante, garantindo o controle de pressão requerido. Ainda, através do aparato, garantiu-se o controle de posicionamento do transdutor durante a execução de cada ensaio, pois os pesos metálicos impediam a movimentação da placa de madeira. Na Figura C.1 é possível observar o aparato em utilização durante um ensaio.

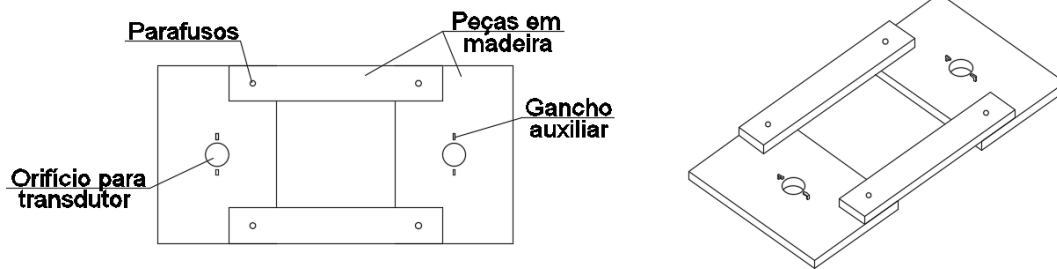
Figura C.1 – Aparato para controle de pressão durante ensaio.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para melhor entendimento da composição placa de madeira, na Figura C.2 está apresentado o desenho esquemático desta peça. Nesta figura, a placa está detalha com as peças constituintes.

Figura C.2 – Placa de madeira com ganchos para controle de pressão dos transdutores.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

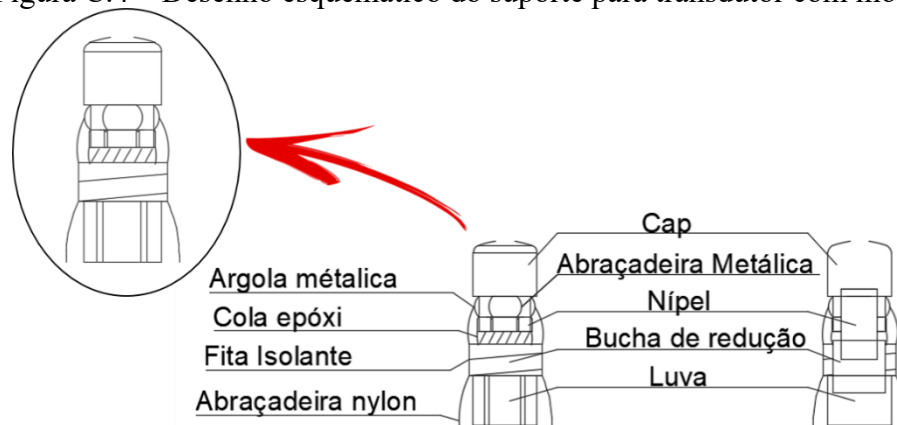
Na Figura C.3 observa-se, de modo mais aproximado, o suporte para transdutor com molas. A partir dessa visualização, foi elaborado o desenho esquemático desta peça apresentado na Figura C.4, em que são nomeadas as peças utilizadas para sua montagem.

Figura C.3 – Suporte para transdutor com molas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura C.4 – Desenho esquemático do suporte para transdutor com molas.


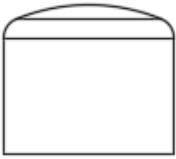

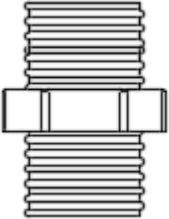

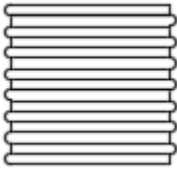

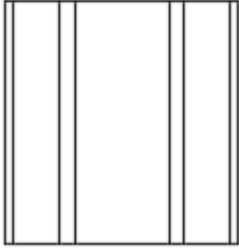


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A montagem deste suporte foi realizada com peças de PVC para condução de água fria em redes prediais, em específico da linha roscável. Para isso, foi utilizado um Cap de bitola 3/4", ao qual foi encaixado um Nípel de bitola 3/4". Ao Nípel, foi rosqueada uma Bucha de redução de bitola 1" x 3/4" e por fim, uma Luva de Bitola 1". Ressalta-se que o arco maior, o qual envolve a bucha de redução, foi retirado. Na Tabela A.1 tem-se a relação dos materiais citados, desenhos esquemáticos e imagens reais de cada peça.

Entre o encaixe do Cap e o arco maior do Nípel, foi fixada uma abraçadeira metálica utilizada para mangueira de gás de cozinha. Nesta abraçadeira, encaixou-se duas argolas/correntes metálicas (uma em cada lateral), as quais foram utilizadas para prender a abraçadeira de nylon. A última era encaixada nos ganchos auxiliares da placa de madeira para garantir estabilidade de pressão e posicionamento do transdutor. Ainda, visando garantir o tamanho correto para encaixe das abraçadeiras nos ganchos, foi utilizada fita isolante na altura do início da Luva para imobilizar a abraçadeira de nylon. A cima do início da Luva, foi utilizada uma camada de cola epóxi para evitar a alteração da rosca entre a luva e a bucha de redução durante a realização dos ensaios.

Tabela C.1 – Peças de PVC constituintes do aparato para controle de pressão.

Peça	Bitola	Imagem	Desenho Esquemático
Cap	3/4"		
Nípel	3/4"		
Bucha de redução	1" x 3/4"		
Luva	1"		

Fonte: Elaborado pela autora (2021) e Amanco (2020).

Na parte superior do Cap abriu-se um orifício para passagem do fio de conexão entre o transdutor e o aparelho de ultrassom. A pressão aplicada aos transdutores foi exercida por um conjunto de três molas posicionadas no interior do suporte, as quais eram pressionadas pelo próprio transdutor ao fixar a abraçadeira de nylon no gancho. O conjunto de três molas foi necessário para alcançar o comprimento de molas necessário, sendo essas encaixadas e coladas com supercola instantânea. Na Figura A.5 é possível observar o posicionamento das molas, em um suporte real, com comprimento iniciando na parte superior do Cap. Na Figura A.6 está a representação gráfica do suporte com mola e transdutor, simulando a tensão na mola antes e após acoplamento. Ressalta-se que o transdutor adentrava no suporte somente até o final da Bucha de redução, uma vez que a parte superior do transdutor tem maior diâmetro que a face de contato com o corpo de prova.

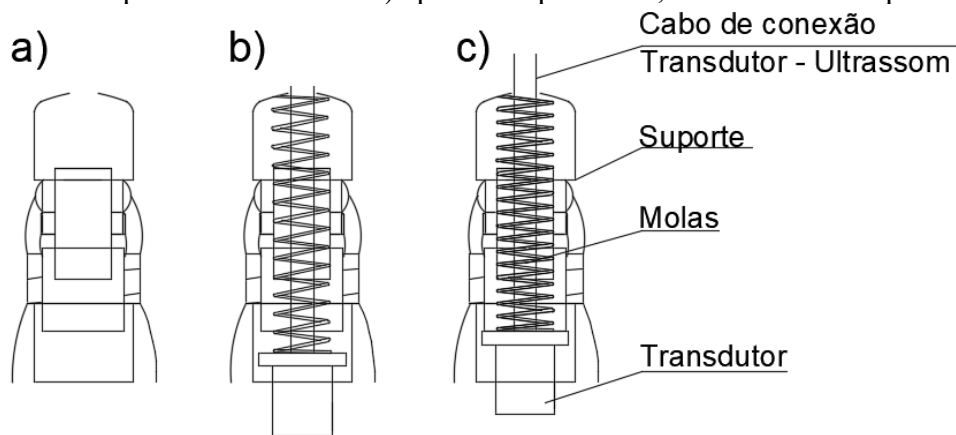


Figura C.5 – Vista inferior do suporte para transdutores, no qual é visível o conjunto de molas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura C.6 – Representação esquemática do suporte para transdutor, onde em a) está representado os componentes internos do suporte, b) o suporte com molas, transdutor e cabo de conexão simulando o estado de tensão da mola antes do acoplamento do suporte nos ganchos da placa de madeira e c) após o acoplamento, com a mola comprimida.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Por fim, os pesos metálicos, também constituintes do aparato, foram obtidos dentro do laboratório de execução do ensaio. Estes pesos garantiram que a placa de madeira ficasse imóvel durante a realização das leituras ultrassônicas, apesar da pressão das molas para movimentá-la para cima.

## APÊNDICE D – Resultados de aderência a normalidade e igualdade de variâncias

Tabela D.1 – Resultados de aderência a normalidade e igualdade de variâncias para a análise de idade, Lote PL-1.

Parâmetro	Idade	Estatística básica			Teste de normalidade (Anderson-Darlin)	Teste de igualdade das variâncias	
		Média	Desv. Pad.	C.v.	P-valor	Variância	P-valor
Difusividade	Geral	21,02	3,30	15,70	0,02		
	1 dia	17,25	1,47	8,55	0,01	2,17	
	2 dias	19,73	1,45	7,35	0,57	2,11	
	3 dias	21,14	3,58	16,95	0,44	12,84	0,30
	7 dias	21,64	3,65	16,88	0,33	13,34	
	28 dias	21,60	3,12	14,45	0,58	9,74	
Dissipação	Geral	8377,01	1335,47	15,94	0,01		
	1 dia	11470,04	932,29	8,13	0,11	869169,70	
	2 dias	8763,23	587,22	6,70	0,43	344824,70	
	3 dias	9151,86	1266,39	13,84	0,27	1603747,90	0,74
	7 dias	7956,61	893,90	11,23	0,03	799064,00	
	28 dias	7602,20	810,32	10,66	0,11	656614,90	
ATME	Geral	1,68e-04	1,29e-05	7,71	0,44		
	1 dia	1,71e-04	9,95e-06	5,82	0,09	9,89e-11	
	2 dias	1,71e-04	8,26e-06	4,84	0,23	6,83e-11	
	3 dias	1,63e-04	1,36e-05	8,37	0,48	1,86e-10	0,84
	7 dias	1,67e-04	1,36e-05	8,15	0,39	2,10e-10	
	28 dias	1,70e-04	1,31e-05	7,74	0,77	1,72e-10	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela D.2 – Resultados de aderência a normalidade e igualdade de variâncias para a análise de idade, Lote PL-2.

Parâmetro	Idade	Estatística básica			Teste de normalidade (Anderson-Darlin)	Teste de igualdade das variâncias	
		Média	Desv. Pad.	C.v.	P-valor	Variância	P-valor
Difusividade	<b>Geral</b>	20,29	3,45	17,03	0,00		
	<b>1 dia</b>	17,11	2,77	16,17	0,36	7,66	
	<b>2 dias</b>	20,24	1,60	7,90	0,58	2,55	
	<b>3 dias</b>	20,71	1,41	6,79	0,70	1,98	
	<b>4 dias</b>	20,44	2,47	12,08	0,74	6,09	
	<b>5 dias</b>	20,56	2,20	10,68	0,42	4,82	
	<b>6 dias</b>	21,41	3,39	15,83	0,21	11,48	0,33
	<b>7 dias</b>	18,81	2,85	15,16	0,63	8,14	
	<b>14 dias</b>	19,77	3,13	15,84	0,42	9,80	
	<b>21 dias</b>	19,58	3,59	18,35	0,50	12,91	
	<b>28 dias</b>	20,49	3,67	17,91	0,78	13,46	
	<b>135 dias</b>	22,26	5,38	24,18	0,00	28,98	
Dissipação	<b>Geral</b>	8893,68	1237,41	13,91	0,01		
	<b>1 dia</b>	12726,18	1860,74	14,62	0,04	3462351,70	
	<b>2 dias</b>	10176,28	515,62	5,07	0,68	265859,90	
	<b>3 dias</b>	9672,37	822,56	8,50	0,70	676610,70	
	<b>4 dias</b>	9154,28	882,65	9,64	0,63	779064,90	
	<b>5 dias</b>	9024,00	721,72	8,00	0,03	520879,60	
	<b>6 dias</b>	8554,62	603,67	7,06	0,86	364422,10	0,05
	<b>7 dias</b>	9124,99	767,14	8,41	0,29	588508,10	
	<b>14 dias</b>	8958,94	695,85	7,77	0,14	484208,70	
	<b>21 dias</b>	8772,71	992,22	11,31	0,10	984506,80	
	<b>28 dias</b>	8302,38	1007,98	12,14	0,03	1016030,20	
	<b>135 dias</b>	7531,50	1021,43	13,56	0,56	1043327,20	
ATME	<b>Geral</b>	1,89e-04	1,43e-05	7,57	0,68		
	<b>1 dia</b>	1,81e-04	7,96e-06	4,40	0,01	6,34e-11	
	<b>2 dias</b>	1,78e-04	6,25e-06	3,50	0,78	3,90e-11	
	<b>3 dias</b>	1,79e-04	4,40e-06	2,46	0,72	1,93e-11	
	<b>4 dias</b>	1,85e-04	8,73e-06	4,73	0,86	7,63e-11	
	<b>5 dias</b>	1,85e-04	9,52e-06	5,14	0,52	9,06e-11	
	<b>6 dias</b>	1,85e-04	1,34e-05	7,27	0,15	1,80e-10	0,06
	<b>7 dias</b>	1,94e-04	1,55e-05	7,95	0,70	2,39e-10	
	<b>14 dias</b>	1,91e-04	1,47e-05	7,72	0,60	2,17e-10	
	<b>21 dias</b>	1,94e-04	1,52e-05	7,84	0,97	2,32e-10	
	<b>28 dias</b>	1,93e-04	1,53e-05	7,92	0,59	2,34e-10	
	<b>135 dias</b>	1,91e-04	1,76e-05	9,19	0,00	3,09e-10	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela D.3 – Resultados de aderência a normalidade e igualdade de variâncias para a análise de distância da borda, Lote PL-1.

Parâmetro	Distância da borda	Estatística básica			Teste de normalidade (Anderson-Darlin)	Teste de igualdade das variâncias	
		Média	Desv. Pad.	C.v.	P-valor	Variância	P-valor
Difusividade	Geral	21,62	3,35	15,51	0,16		
	5	21,83	3,96	18,14	0,20	15,69	0,54
	10	19,74	1,80	9,11	0,05	3,24	
	20	20,85	2,34	11,20	0,47	5,45	
	30	20,95	3,25	15,51	0,11	10,56	
	40	24,71	3,40	13,76	0,12	11,56	
Dissipação	Geral	7779,41	861,04	11,07	0,03		
	5	7889,32	895,43	11,35	0,04	801803,20	0,82
	10	8080,43	934,06	11,56	0,24	872472,50	
	20	7567,34	742,76	9,82	0,45	551691,50	
	30	8060,22	1017,70	12,63	0,77	1035709,50	
	40	7299,71	589,09	8,07	0,01	347032,60	
ATME	Geral	1,68e-04	1,37e-05	8,13	0,88		
	5	1,67e-04	1,79e-05	10,70	0,13	3,20e-10	0,38
	10	1,76e-04	5,77e-06	3,29	0,74	3,32e-11	
	20	1,73e-04	1,02e-05	5,87	0,11	1,04e-10	
	30	1,70e-04	1,14e-05	6,70	0,36	1,29e-10	
	40	1,56e-04	1,43e-05	9,12	0,26	2,03e-10	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela D.4 – Resultados de aderência a normalidade e igualdade de variâncias para a análise de distância da borda, Lote PL-2.

Parâmetro	Distância da borda	Estatística básica			Teste de normalidade (Anderson-Darlin)	Teste de igualdade das variâncias	
		Média	Desv. Pad.	C.v.	P-valor	Variância	P-valor
Difusividade	Geral	19,65	3,35	17,06	0,63		
	5	18,64	2,62	14,06	0,52	6,87	
	10	16,48	2,43	14,76	0,75	5,92	
	20	20,78	3,10	14,89	0,47	9,58	
	30	22,50	3,61	16,03	0,87	13,02	
	40	19,84	1,96	9,90	0,93	3,86	0,77
Dissipação	Geral	8713,68	977,35	11,22	0,80		
	5	8824,94	812,37	9,21	0,60	659945,80	
	10	9085,75	979,32	10,78	0,90	959076,40	
	20	8735,25	835,44	9,56	0,60	697962,10	
	30	8153,90	768,16	9,42	0,22	590070,20	
	40	8768,57	1371,27	15,64	0,54	1880373,00	0,27
ATME	Geral	1,94e-04	1,52e-05	7,84	0,97		
	5	1,98e-04	1,17e-05	5,88	0,14	1,36e-10	
	10	2,11e-04	1,20e-05	5,66	0,86	1,43e-10	
	20	1,87e-04	1,32e-05	7,06	0,51	1,73e-10	
	30	1,80e-04	1,06e-05	5,86	0,42	1,12e-10	
	40	1,92e-04	8,67e-06	4,52	0,67	7,51e-11	0,94

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela D.5 – Resultados de aderência a normalidade e igualdade de variâncias para a análise da influência do agregado gráudo, Lotes PR-1 e PR-2.

Parâmetro	Tipo de brita	Estatística básica			Teste de normalidade (Anderson-Darlin)	Teste de igualdade das variâncias	
		Média	Desv. Pad.	C.v.	P-valor	Variância	P-valor
Difusividade	Geral	21,62	2,74	12,70	0,42		
	B1	21,61	3,06	14,16	0,67	9,36	0,04
	B0	21,62	2,41	11,14	0,20	5,80	
Dissipação	Geral	6328,65	1183,85	18,71	1,56e-14		
	B1	6358,22	1414,18	22,24	3,71e-06	1999890,80	2,35e-03
	B0	6299,07	904,90	14,37	6,53e-12	818843,40	
ATME	Geral	2,01e-04	1,93e-05	9,59	0,27		
	B1	2,07e-04	2,14e-05	10,33	0,64	4,57e-10	4,01e-03
	B0	1,95e-04	1,50e-05	7,66	0,41	2,24e-10	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela D.6 – Resultados de aderência a normalidade e igualdade de variâncias para a análise da influência da face, Lote PR-1.

Parâmetro	Face	Estatística básica			Teste de normalidade (Anderson-Darlin)	Teste de igualdade das variâncias	
		Média	Desv. Pad.	C.V.	P-valor	Variância	P-valor
1Difusividade	<b>Geral</b>	21,62	3,05	14,11	0,67		
	<b>F1</b>	22,04	2,40	10,88	0,73	5,75	
	<b>F2</b>	21,53	2,78	12,91	0,58	7,73	<0,01
	<b>F3</b>	21,44	4,69	21,88	0,51	21,99	
	<b>F4</b>	21,23	2,25	10,58	0,51	5,05	
Dissipação	<b>Geral</b>	6358,22	1414,18	22,24	<0,001		
	<b>F1</b>	6961,24	1919,58	27,58	0,03	3,68E+06	
	<b>F2</b>	5794,82	739,83	12,77	0,21	5,47E+05	3,20E-03
	<b>F3</b>	6029,55	1078,35	17,88	0,28	1,16E+06	
	<b>F4</b>	6345,77	1018,51	16,05	0,09	1,04E+06	
ATME	<b>Geral</b>	2,07E-04	2,14E-05	10,33	0,64		
	<b>F1</b>	1,98E-04	2,06E-05	10,39	0,53	4,25E-10	
	<b>F2</b>	2,13E-04	1,91E-05	8,96	0,11	3,64E-10	0,53
	<b>F3</b>	2,14E-04	2,49E-05	11,67	0,57	6,22E-10	
	<b>F4</b>	2,08E-04	1,77E-05	8,52	0,89	3,13E-10	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela D.7 – Resultados de aderência a normalidade e igualdade de variâncias para a análise da influência da idade, Lote PR-1.

Parâmetro	Idade	Estatística básica			Teste de normalidade (Anderson-darlin)	Teste de igualdade das variâncias	
		Média	Desv. Pad.	C.v.	P-valor	Variância	P-valor
Difusividade	<b>Geral</b>	21,62	3,05	14,11	0,67		
	<b>1 dia</b>	21,76	3,11	14,28	0,81	9,65	0,50
	<b>7 dias</b>	21,63	3,41	15,77	0,88	11,64	
	<b>91 dias</b>	21,56	2,75	12,74	0,87	7,55	
	<b>Geral</b>	6358,22	1414,18	22,24	0,00		
Dissipação	<b>1 dia</b>	9057,96	1590,76	17,56	0,26	2530528,60	<0,01
	<b>7 dias</b>	6681,00	888,72	13,30	0,79	789827,00	
	<b>91 dias</b>	5360,52	444,66	8,30	0,11	197720,40	
	<b>Geral</b>	2,07E-04	2,14E-05	10,33	0,64		
ATME	<b>1 dia</b>	1,82E-04	1,90E-05	10,45	0,37	3,60E-10	0,95
	<b>7 dias</b>	2,02E-04	1,82E-05	8,99	0,23	3,31E-10	
	<b>91 dias</b>	2,18E-04	1,77E-05	8,11	0,52	3,13E-10	
	<b>Geral</b>	2,07E-04	2,14E-05	10,33	0,64		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela D.8 – Resultados de aderência a normalidade e igualdade de variâncias para a análise da influência da geometria das amostras para a idade de 7 dias, Lotes PL-1, PL-2 e PR-1.

Parâmetro	Tipo de brita	Estatística básica			Teste de normalidade (Anderson-Darlin)	Teste de igualdade das variâncias	
		Média	Desv. Pad.	C.v.	P-valor	Variância	P-valor
Difusividade	Geral	20,89	3,53	16,88	0,45		
	B1	20,23	3,54	17,49	0,23	12,51	0,67
	B0	21,63	3,41	15,77	0,88	11,64	
Dissipação	Geral	7659,84	1332,64	17,40	0,42		
	B1	8540,80	1012,93	11,86	0,25	1026022,00	0,38
	B0	6681,00	888,72	13,30	0,79	789827,00	
ATME	Geral	1,91E-04	2,20E-05	11,51	0,78		
	B1	1,81E-04	2,02E-05	11,17	0,62	4,08E-10	0,77
	B0	2,02E-04	1,82E-05	8,99	0,23	3,31E-10	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

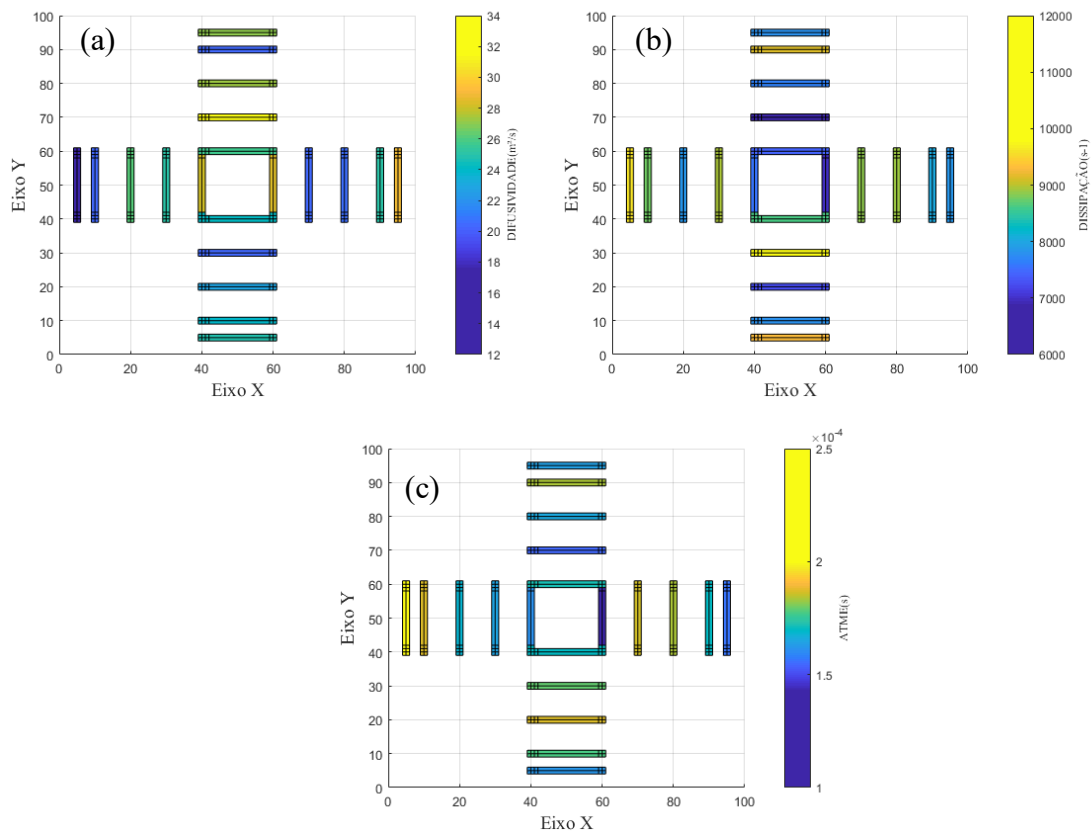
Tabela D.9 – Resultados de aderência a normalidade e igualdade de variâncias para a análise da influência da geometria das amostras com os dados após 28 dias, Lotes PL-2 e PR-1.

Parâmetro	Tipo de brita	Estatística básica			Teste de normalidade (Anderson-Darlin)	Teste de igualdade das variâncias	
		Média	Desv. Pad.	C.v.	P-valor	Variância	P-valor
Difusividade	Geral	21,81	3,86	17,71	0,00		
	B1	22,26	5,38	24,18	0,00	28,98	0,17
	B0	21,56	2,75	12,74	0,87	7,55	
Dissipação	Geral	6135,868	1260,17	20,54	0,00		
	B1	7531,503	1021,4339	13,56	0,56	1043327,2	<0,01
	B0	5360,515	444,6577	8,30	0,11	197720,4	
ATME	Geral	2,09E-04	2,18E-05	10,45	0,19		
	B1	1,91E-04	1,76E-05	9,19	0,00	3,09E-10	0,35
	B0	2,18E-04	1,77E-05	8,11	0,52	3,13E-10	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

## APÊNDICE E – Gráficos de superfície dos parâmetros difusos obtidos no Lote PL para as idades de 7 e 28 dias

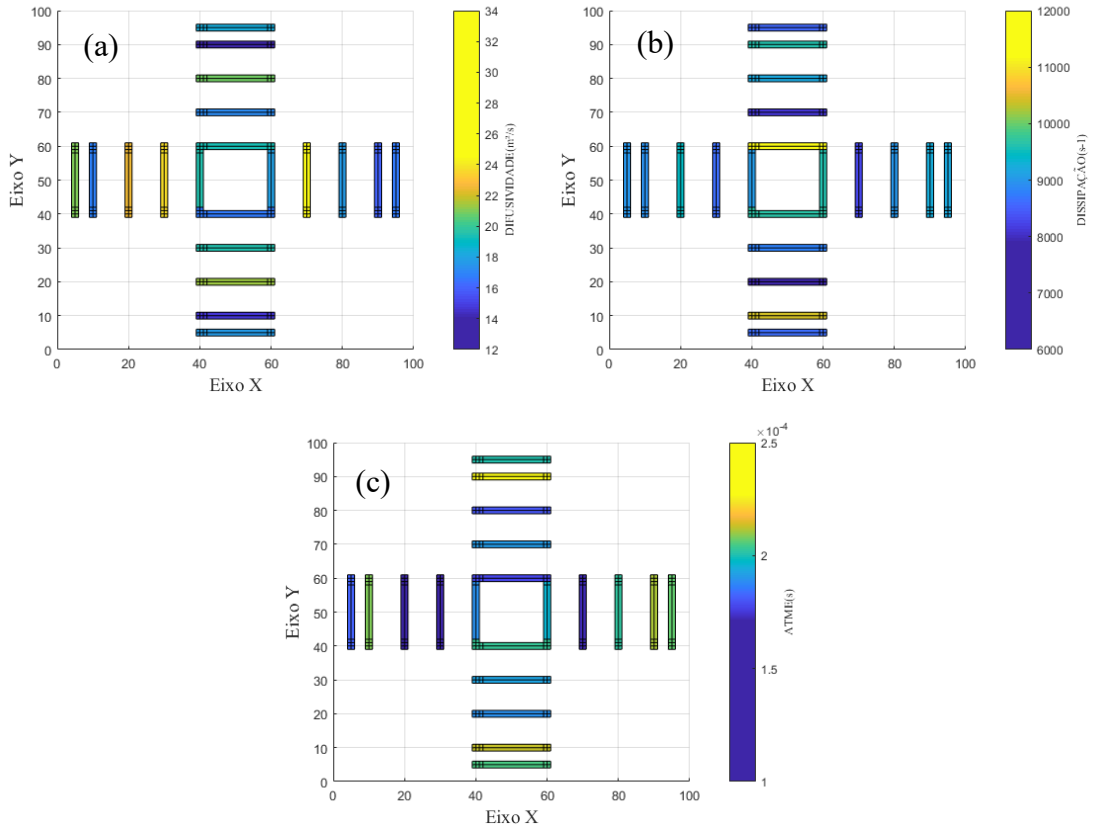
Figura E-01 – Representação gráfica dos valores dos parâmetros difusos obtidos para o Lote PL-1 aos 28 dias de idade, sendo (a) Difusividade ( $m^2/s$ ), (b) Dissipação ( $s^{-1}$ ) e (c) ATME (s).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

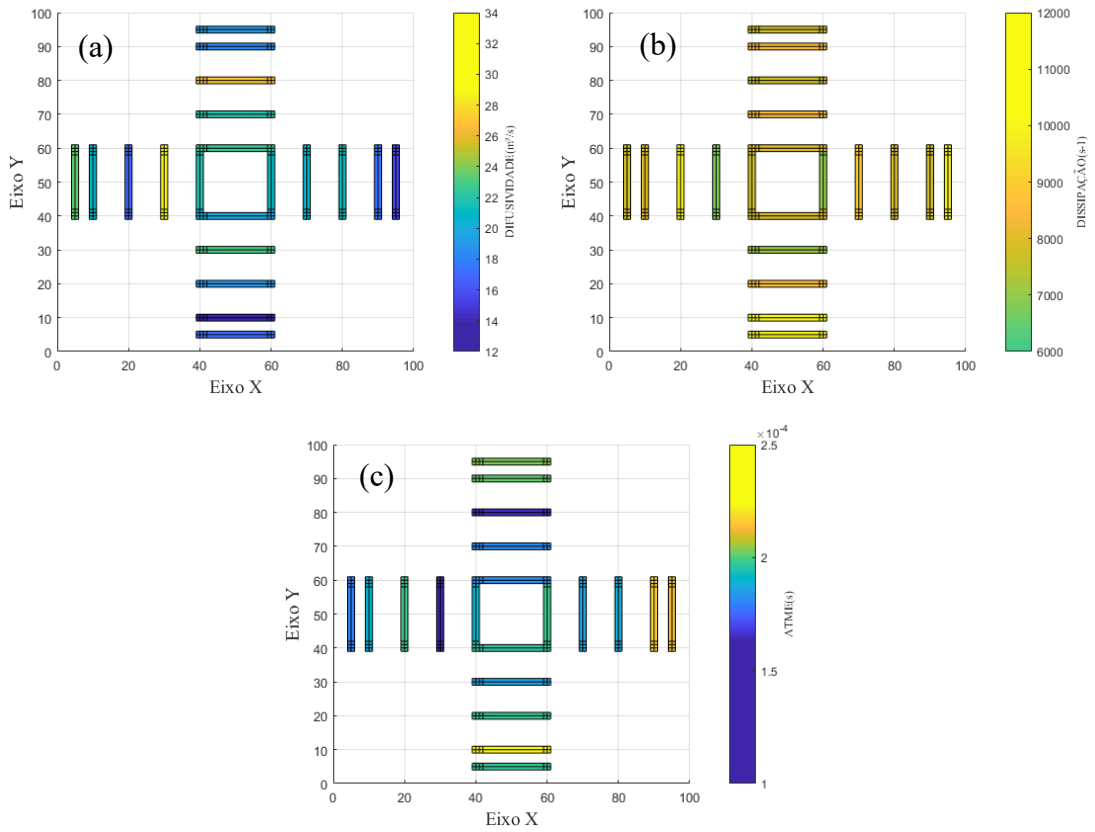


Figura E-02 - Representação gráfica dos valores dos parâmetros difusos obtidos para o Lote PL-2 aos 7 dias de idade, sendo (a) Difusividade ( $m^2/s$ ), (b) Dissipação ( $s^{-1}$ ) e (c) ATME (s).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura E-03 - Representação gráfica dos valores dos parâmetros difusos obtidos para o Lote PL-2 aos 28 dias de idade, sendo (a) Difusividade ( $m^2/s$ ), (b) Dissipação ( $s^{-1}$ ) e (c) ATME (s),



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

# ANEXO A – Caracterização cimento CP V ARI



CIMENTOS

**REFERÊNCIA**

REFERENCE

**FÁBRICA**

PLANT | USINE

**Cimento Portland**

Portland Cement | Ciment Portland

**Adrianópolis**

**CP V ARI**

**DATA DE ANÁLISE**

PRODUCTION DATE | DATE DE PRODUCTION

**DATA DE EMISSÃO**

DATE

01/03/2019 a 29/03/2019

**LAUDO TÉCNICO**

TYPICAL ANALYSIS BULLETIN | BULLETIN D'ANALYSE TYPE

**ENSAIOS MECÂNICOS**

MECHANICAL TESTS | ESSAIS MECANQUES

**NORMA**

NBR 16697

IDADE AGE	Resistência à Compressão Compressive Strength   Résistance à la Compression		
1 dia day   jour	MPa	26	≥ 14
3 dias days   jours	MPa	37	≥ 24
7 dias days   jours	MPa	42	≥ 34
28 dias days   jours	MPa	49	--

**ENSAIOS FÍSICOS**

PHYSICAL TESTS | ESSAIS PHYSIQUES

**NORMA**

NBR 16697

<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b> Specific Weight   Masse Volumique		3,13	
<b>Peso Litro (g/l)</b> Bulk Density   Densité Apparent		NA	
<b>Resíduo de Peneiração (%)</b> Sieve Residue   Residue de Tamisage	90 µm	NA	
	75 µm	--	≤ 6,0
	45 µm	1,19	
	32 µm	7,05	
<b>Sup. Específica de Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b> Blaine Spec. Surface   Surface spécif. Blaine		4025	≥ 3000
<b>Água na Pasta Normal (%)</b> Water Demand   Eau de Gâchage		28,33	
<b>Tempo de Pega (min)</b> Setting Time   Temps de Prise	<b>Início</b> Initial   Debut	223	≥ 60
	<b>Fim</b> Final   Fin	286	≤ 600
<b>Expansibilidade (mm)</b> Soundness   Expansion			≤ 5,0

<p><b>Obs.</b></p>
--------------------

**ANÁLISE QUÍMICA**

CHEMICAL ANALYSIS | ANALYSE CHIMIQUE

**NORMA**

NBR 16697

<b>Perda ao Fogo</b> Loss on Ignition   Perte au Feu	%	--	4,3	≤ 6,5
<b>Resíduo Insolúvel</b> Insoluble Residue   Résidu Insoluble	%	--	1,3	≤ 3,5
<b>Óxido de Silício</b> Silicon Oxide   Oxyde de Silicium	%	SiO <sub>2</sub>	17,8	
<b>Óxido de Alumínio</b> Aluminium Oxide   Oxyde de Aluminium	%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,3	
<b>Óxido de Ferro</b> Ferric Oxide   Oxyde de Fer	%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,8	
<b>Óxido de Cálcio</b> Calcium Oxide   Oxyde de Calcium	%	CaO	59,0	
<b>Óxido de Magnésio</b> Magnesium Oxide   Oxyde de Magnésium	%	MgO	6,2	≤ 6,5
<b>Sulfatos</b> Sulfates   Sulfates	%	SO <sub>3</sub>	2,9	≤ 4,5
<b>Óxido de Potássio</b> Potassium Oxide   Oxyde de Potassium	%	K <sub>2</sub> O	0,99	
<b>Óxido de Sódio</b> Sodium Oxide   Oxyde de Sodium	%	Na <sub>2</sub> O	0,23	
<b>Cloretos</b> Chloride   Chlorures	%	Cl	0,0	
<b>Anidrido Carbônico</b> Carbon dioxide   Dioxyde de Carbon	%	CO <sub>2</sub>	3,2	≤ 5,5
<b>Cal Livre</b> Free Lime   Chaux Libre	%		0,5	
<b>Fator de Saturação da Cal</b> Lime Saturation Factor   Depot de Chaux			103,7	
<b>Módulo de Silica</b> Silica Ratio   Indice Silicieux			2,5	
<b>Módulo de Alumina</b> Alumina-iron Ratio   Indice Alumineux			1,5	

**ANÁLISE MINERALÓGICA**

MINEROLOGICAL ANALYSIS | ANALYSE MINÉRALOGIQUE


**XRD**

<b>Silicato Tricálcico</b> Tricalcium Silicate   Silicate Tricalcique	%	C3S	55,86	
<b>Silicato Bicálcico</b> Dicalcium Silicate   Silicate Bicalcique	%	C2S	11,71	
<b>Aluminato Tricálcico</b> Tricalcium Aluminate   Aluminate Tricalcique	%	C3A	2,91	
<b>Ferro-aluminato Tetracálcico</b> Tetracalcium Aluminoferrite   Ferraluminat Tetracalcique	%	C4AF	9,39	

*[Handwritten Signature]*

APROVADO  
APPROVED | APPROVÉ

## ANEXO B – Caracterização aditivo superplastificante

 **gcp**  
applied technologies

**Ficha de dados de segurança**  
Em conformidade com NBR 14725-2014

página: 1/7

data da impressão 02.09.2019 Número da versão 1.0 Revisão: 25.10.2018

---

### 1 Identificação

**Identificador do produto**  
Nome comercial: **ADVA Cast 525**

**Utilizações identificadas relevantes da substância ou mistura** Principais usos recomendados para a substância ou mistura.  
**Identificados utilizações desaconselhadas:** Não existe mais nenhuma informação relevante disponível.

**Identificação do fornecedor da ficha de dados de segurança**  
**Fabricante/fornecedor:**  
GCP Brazil Indústria e Comércio de Productos Químicos Ltda.  
Av. Paraná, nº 4690, Cep: 18105-000  
Cajuru do Sul – Sorocaba – SP

18105-000  
Tel: ++55 (015)3235-4700  
Fax: ++55 (015)3235-4705

**Entidade para obtenção de informações adicionais:** email: msds.gcp@gcpat.com

**Telefone para emergências:**  
RESTEC Argentina: +(54)-11-4301-0205  
PROQUIMICA Brasil: 0800 - 118270  
CITUC QUIMICO Chile: +(56)-2-247-3600  
CISTEM ARP SURA Colombia: 01-800-51-1414  
SETIQ Mexico: +(55)-5559-1588  
SGS Peru: +51+1+5171900


---

### 2 Identificação de perigos

**Classificação da substância ou mistura**  
Sensibilização à pele – Categoria 1 H317 Pode provocar reações alérgicas na pele.  
Perigoso ao ambiente aquático (agudo) – Categoria 3 H402 Nocivo para os organismos aquáticos.

**Elementos de rotulagem**  
**Elementos de rotulagem do GHS** O produto classificou-se e está etiquetado em conformidade com ABNT-NBR 14725.

**Pictogramas de perigo**

  
GHS07

**Palavra-sinal** Atenção

**Advertências de perigo**  
Pode provocar reações alérgicas na pele.  
Nocivo para os organismos aquáticos.

**Frases de precaução**  
Evite inalar as poeiras/fumos/gases/névoas/vapores/aerossóis.  
A roupa de trabalho contaminada não pode sair do local de trabalho.  
Evite a liberação para o meio ambiente.  
Use luvas de proteção.  
**EM CASO DE CONTATO COM A PELE:** Lave com água em abundância..  
Retire toda a roupa contaminada e lave-a antes de usá-la novamente.

( continuação na página 2 )  
BR

Ficha de dados de segurança  
Em conformidade com NBR 14725-2014

data da impressão 02.09.2019

Número da versão 1.0

Revisão: 25.10.2018

Nome comercial: **ADVA Cast 525**

(continuação da página 1)

Em caso de irritação ou erupção cutânea: Consulte um médico.  
Eliminar o conteúdo/recipiente de acordo com a legislação local/regional/nacional/internacional.

**Outros perigos**

**Resultados da avaliação PBT e mPmB**

**PBT:** Não aplicável.  
**mPmB:** Não aplicável.

**3 Composição e informações sobre os ingredientes**

**Caracterização química: Misturas**

**Descrição:** Mistura das substâncias listadas a seguir como substâncias perigosas.

**Substâncias perigosas:**

126-71-6	fosfato de triisobutilo Sensibilização à pele – Categoria 1B, H317	0,1-<1%
52-51-7	bronopol Lesões oculares graves/irritação ocular – Categoria 1, H318 Perigoso ao ambiente aquático (agudo) – Categoria 1, H400 Toxicidade aguda - Oral – Categoria 4, H302; Toxicidade aguda - Dérmica – Categoria 4, H312; Corrosão/irritação à pele – Categoria 2, H315; Toxicidade para órgãos-alvo específicos (exposição única) – Categoria 3, H335	0-<0,05%
55965-84-9	5-Chloro-2-methyl-3(2H)-isothiazolone, mixture with 2-methyl-3(2H)-isothiazolone Toxicidade aguda - Oral – Categoria 3, H301; Toxicidade aguda - Dérmica – Categoria 3, H311; Toxicidade aguda - Inalação – Categoria 3, H331 Corrosão/irritação à pele – Categoria 1B, H314 Perigoso ao ambiente aquático (agudo) – Categoria 1, H400; Perigoso ao ambiente aquático (crônico) – Categoria 1, H410 Sensibilização à pele – Categoria 1, H317	0-<0,05%

**4 Medidas de primeiros-socorros**

**Descrição das medidas de primeiros socorros**

**Indicações gerais:** Em caso de mal-estar, consulte um médico.

**Em caso de inalação:**

**EM CASO DE INALAÇÃO:** Remova a pessoa para local ventilado e a mantenha em repouso numa posição que não dificulte a respiração.

Procurar que exista ar.

**Em caso de contato com a pele:** Lavar imediatamente com água.

**Em caso de contato com os olhos:** Enxágue cuidadosamente com água durante vários minutos.

**Em caso de ingestão:**

Enxágue a boca.

NÃO provoque vômito.

**Notas para o médico:**

**Sintomas e efeitos mais importantes, agudos ou tardios** Aparecimentos alérgicos

**Indicações sobre cuidados médicos urgentes e tratamentos especiais necessários**

Não existe nenhuma informação relevante disponível.

BR  
(continuação na página 3)



Ficha de dados de segurança  
Em conformidade com NBR 14725-2014

data da impressão 02.09.2019

Número da versão 1.0

Revisão: 25.10.2018

Nome comercial: **ADVA Cast 525**

( continuação da página 3 )

**Proteção das mãos:** Luvas devem ser usadas para prevenir contato com a pele.

**Material das luvas:** Borracha de isobutileno-isopreno

**Proteção dos olhos/face:** É aconselhado o uso de óculos de proteção em caso de trasfegar.

**Proteção da pele:**

Usar o equipamento de proteção individual exigido.

Retire a roupa contaminada.

### 9 Propriedades físicas e químicas

#### Informações sobre propriedades físicas e químicas de base

##### Informações gerais

Aspecto:	
Forma:	Líquido
Cor:	Laranja
Odor:	Característico
Limite de odor:	Não classificado.

valor pH (~) em 25 °C: 4

Mudança do estado:	
Ponto de fusão/ponto de congelamento:	Não determinado.
Ponto de ebulição inicial e faixa de temperatura de ebulição:	Não classificado.
Ponto de fulgor:	Não aplicável.

Inflamabilidade (sólido, gás): Não aplicável.

Temperatura de ignição: Não classificado.

Temperatura de decomposição:	Não classificado.
Temperatura de autoignição:	Não classificado.
Propriedades explosivas:	O produto não corre o risco de explosão.

Limites de explosão:	
Inferior:	Não classificado.
Superior:	Não classificado.
% Voláteis:	Não classificado.
Densidade em 25 °C:	1,1 g/cm <sup>3</sup>
Densidade de vapor:	Não classificado.
Taxa de evaporação:	Não classificado.

Solubilidade em / miscibilidade com água: Não classificado.

Coefficiente de partição – n-octanol/água: Não classificado.

Viscosidade:	
Dinâmico:	Não classificado.
Cinemático:	Não classificado.

Outras informações: Não existe mais nenhuma informação relevante disponível.

### 10 Estabilidade e reatividade

#### Reatividade

Estável à temperatura ambiente.

Não existe mais nenhuma informação relevante disponível.

( continuação na página 5 )

BR

**Ficha de dados de segurança**  
Em conformidade com NBR 14725-2014

data da impressão 02.09.2019

Número da versão 1.0

Revisão: 25.10.2018

Nome comercial: **ADVA Cast 525**

(continuação da página 4)

**Estabilidade química**

**Decomposição térmica / condições a evitar:** Não há decomposição se usado de acordo com as especificações.

**Possibilidade de reações perigosas**

Não se conhecem reações perigosas.

Não existe mais nenhuma informação relevante disponível.

**Condições a serem evitadas** Não existe mais nenhuma informação relevante disponível.

**Materiais incompatíveis:** Pode degradar poli vinil (PVC) e outros materiais plásticos.

**Produtos perigosos da decomposição:** Monóxido de carbono e dióxido de carbono

**11 Informações toxicológicas**

**Informações sobre os efeitos toxicológicos**

**Toxicidade aguda**

**Valores LD/LC50 relevantes para a classificação:**

**52-51-7 bronopol**

por via oral LD50 305 mg/kg (rato)

por via dérmica LD50 >2.000 mg/kg (rato)

**55965-84-9 5-Chloro-2-methyl-3(2H)-isothiazolone, mixture with 2-methyl-3(2H)-isothiazolone**

por via oral LD50 53 mg/kg (rato)

MUREAV Mutation Research. (Elsevier Science Pub. B.V., POB 211, 1000 AE Amsterdam, Netherlands) V.1- 1964- Volume(issue)/page/year: 118,129,1983

por via dérmica LD50 141 mg/kg (rato)

**Efeito de irritabilidade primário:**

**Corrosão/irritação cutânea** Nenhum efeito excitante.

**Lesões oculares graves/irritação ocular** Nenhum efeito irritante.

**Sensibilização respiratória ou cutânea** Pode provocar uma reação alérgica cutânea.

**Avisos adicionais de toxicologia:** Este produto deve ser etiquetado de acordo com as regulamentações aplicáveis.

**12 Informações ecológicas**

**Toxicidade**

**Toxicidade aquática:**

**52-51-7 bronopol**

EC50, 72h 0,4 mg/l (algae)

EC50, 48h 1,4 mg/l (daphnia magna)

**55965-84-9 5-Chloro-2-methyl-3(2H)-isothiazolone, mixture with 2-methyl-3(2H)-isothiazolone**

EC50, 48h 0,16 mg/l (algae)

LC/EC/IC50 0,018 mg/l (algae) (IC50, 72h)

**Persistência e degradabilidade** Não existe mais nenhuma informação relevante disponível.

**Comportamento em sistemas ambientais:**

**Potencial bioacumulativo** Não existe mais nenhuma informação relevante disponível.

**Mobilidade no solo** Não existe mais nenhuma informação relevante disponível.

**Outras indicações ecológicas:**

**Indicações gerais:** prejudicial para organismos aquáticos

(continuação na página 6)



Ficha de dados de segurança  
Em conformidade com NBR 14725-2014

data da impressão 02.09.2019

Número da versão 1.0

Revisão: 25.10.2018

Nome comercial: *ADVA Cast 525*

(continuação da página 5)

**Resultados da avaliação PBT e mPmB**

PBT: Não aplicável.  
mPmB: Não aplicável.

**Outros efeitos adversos** Não existe mais nenhuma informação relevante disponível.

**13 Considerações sobre destinação final**

**Métodos recomendados para destinação final**

Recomendação:



Não se pode fazer a disposição conjuntamente com o lixo doméstico. Não deixe que se filtre à canalização.

**Embalagens contaminadas:**

Recomendação: Tratamento conforme regulamentações locais, estaduais e federais.

**14 Informações sobre transporte**

**Número ONU**  
ANTT, IMDG, IATA Não regulamentado

**Nome apropriado para embarque**  
ANTT, IMDG, IATA Não regulamentado

**Classe /subclasse de risco principal e subsidiário**  
ANTT, IMDG, IATA Não regulamentado  
Classe

**Grupo de embalagem**  
ANTT, IMDG, IATA Não regulamentado

**Perigo ao meio ambiente:** Não aplicável.

**Precauções especiais para o utilizador** Não regulamentado

**UN "Model Regulation":** Não regulamentado

**15 Informações sobre regulamentações**

**Regulamentações específicas de segurança, saúde e meio ambiente para o produto químico**

Para informações sobre uma identificação dos perigos, ver o capítulo 2.

**Diretiva 2012/18/UE**

**Substâncias perigosas designadas - ANEXO I** Nenhum dos componentes se encontra listado.

**Disposições nacionais:**

Regulamentações: Decreto Federal nº 2.657, de 3 de julho de 1998  
Norma ABNT-NBR 14725-4:2014

Informações sobre riscos e segurança: Portaria 3214/1978: Normas  
Regulamentadoras do MTE, NR-26

(continuação na página 7)

BR



**Ficha de dados de segurança**  
Em conformidade com NBR 14725-2014

data da impressão 02.09.2019

Número da versão 1.0

Revisão: 25.10.2018

Nome comercial: *ADVA Cast 525*

(continuação da página 6)

**Avaliação da segurança química:** Não foi realizada nenhuma Avaliação de Segurança Química.

**16 Outras informações**

Os dados baseiam-se no estado actual dos nossos conhecimentos, embora não representem uma garantia das propriedades do produto e não fundamentam uma situação jurídica.

**Departamento que elaborou a ficha de segurança:**

**COLOMBIA**

Parquiámerica, Mamonal Km 6 Bodega 4 y 5 Manzana G

Cartagena, Colombia

T +57 5 6930230 | M +57 3114621174

Línea 123 - Línea de atención 24 horas CISTEMA ARL SURA 01 8000 51 1414 ó +57(1)405-5911

**MEXICO**

Av. Isidro Fabela s/n

Parque Industrial

52600 Santiago Tianguistenco, México

Mexico: + (722) 276-1300 (24 hours)

**BRAZIL**

Av. Paraná, 4690 Cajuru do Sul

Sorocaba SP, Brazil 18105-000

Tel: +55 (15) 3235-4700 Fax: +55 (15) 3235-4705

Telefone para Emergência durante Transporte:

Proquímica - 0800-118270

**CHILE**

Camino El Otoño 525

Lampa, Santiago - Chile

Teléfono: 56-02-4842300

Fax: 56-2-4842392

**ARGENTINA**

Primera Junta 570

Quilmes, B1878IPL ARGENTINA

Phone: 54 11-4229-5303

BR