

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

**Estudo numérico da heterogeneidade do concreto
por meio da variação da velocidade do pulso
ultrassônico**

José Renan Neves de Souza

Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade
de São Paulo

José Renan Neves de Souza

Estudo numérico da heterogeneidade do concreto por meio da variação da velocidade do pulso ultrassônico

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Guilherme Haach

São Carlos

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

S719e Souza, José Renan Neves de
Estudo numérico da heterogeneidade do concreto por
meio da variação da velocidade do pulso ultrassônico /
José Renan Neves de Souza; orientador Vladimir
Guilherme Haach. São Carlos, 2023.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de
Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2023.

1. Heterogeneidade. 2. ensaios não destrutivos. 3.
concreto. 4. ultrassom. 5. velocidade do pulso
ultrassônico. 6. agregados graúdos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOSÉ RENAN NEVES DE SOUZA**.

Título da dissertação: "Estudo numérico da heterogeneidade do concreto por meio da variação da velocidade do pulso ultrassônico".

Data da defesa: 14/02/2023.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado **Vladimir Guilherme Haach**

(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **Gustavo Henrique Siqueira**

(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Profa. Dra. **Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira**

(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

(Engenharia de Estruturas):

Prof. Associado **Vladimir Guilherme Haach**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido suas graças principalmente nos momentos mais difíceis que passei.

Aos meus familiares, em especial, meus pais Almiro e Helenice pelo apoio, companheirismo, mensagens de otimismo e por estarem sempre presentes, serei eternamente grato por tudo.

Quero agradecer ao professor e orientador Vladimir pela disponibilidade e por ser receptivo aos meus questionamentos proporcionando ricas discussões sobre o tema estudado. Obrigado por todos os conselhos e direcionamentos apresentados durante a realização deste trabalho.

Agradeço a minha namorada, Leilyane, pelo companheirismo, paciência e apoio. Sou muito grato pelos momentos que compartilhamos juntos.

Aos amigos que fiz durante o mestrado, Bruno Bianchi, Fernanda Gabriella, Felipe Duarte, Lucas Araújo, Pedro Facholli, Lilliane Uemura e Marcela Bassoli, esta caminhada se tornou muito mais leve com a presença de vocês.

Aos meus amigos da UFBA que entraram junto comigo no mestrado, Adrielle Nascimento, Filipe Malaquias e Jezreel Ferreira. Obrigado por todo suporte e contribuição pessoal e profissional durante estes 7 anos de convivência.

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

*Para Almiro e Helenice,
meus pais.*

RESUMO

SOUZA, J.R.N **Estudo numérico da heterogeneidade do concreto por meio da variação da velocidade do pulso ultrassônico**. 2023. 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, estando presente desde construções de pequeno porte a grandes obras de infraestrutura. Devido a sua vasta aplicabilidade, as estruturas de concreto necessitam de constantes monitoramentos das suas propriedades a fim de garantir o seu desempenho e durabilidade. Nesse sentido, os ensaios não destrutivos são considerados uma alternativa promissora na avaliação dessas estruturas, pois permitem de maneira rápida e eficiente verificar a homogeneidade dos elementos de concreto, sem que sua aparência e desempenho sejam afetados. Dentre os métodos não destrutivos existentes, o ensaio de pulso ultrassônico vem se destacado bastante. Entre as principais aplicações desse método, está a avaliação da homogeneidade do material e a determinação das suas propriedades mecânicas por meio da velocidade do pulso. No entanto, as medidas de velocidades são sensíveis às mudanças das propriedades do meio, tornando o comportamento da onda mecânica complexo quando atravessam materiais heterogêneos, como o concreto. Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar a heterogeneidade do concreto através da variação da velocidade do pulso ultrassônico, utilizando métodos numéricos. Para isso, foi avaliado como as principais propriedades do agregado graúdo influenciam nas medidas de velocidades pulso e no Coeficiente de Variação (CV). A partir dos resultados, foram desenvolvidas duas equações. A primeira equação pode ser utilizada para estimar a velocidade do pulso ultrassônico no concreto em função do volume dos agregados existentes na mistura. Já a segunda equação foi desenvolvida por meio do processo de Fitting (ajuste) dos dados buscando compreender o comportamento do CV. Com base nos resultados obtidos nas simulações numéricas foi verificado que a diferença entre a velocidade da partícula e do contínuo apresentou um impacto relevante nas medidas de velocidades do pulso assim como no CV, sendo esse parâmetro considerado o mais importante no estudo da heterogeneidade do concreto. Por fim, ambas as expressões desenvolvidas foram confrontadas com resultados experimentais na qual foi possível verificar a potencialidade de sua aplicação.

Palavras-chave: heterogeneidade; ensaios não destrutivos; concreto; ultrassom; velocidade do pulso ultrassônico; agregados graúdos.

ABSTRACT

SOUZA, J.R.N **Numerical study of concrete heterogeneity through variation of ultrasonic pulse velocity**. 2023. 94p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structural Engineering)) - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2023.

Concrete is the most used material in civil construction, being present from small constructions to large infrastructure works. Due to its wide applicability, concrete structures need constant monitoring of their properties in order to ensure their performance and durability. In this sense, non-destructive testing is considered a promising alternative in the evaluation of these structures, because it allows a quick and efficient way to verify the homogeneity of the concrete elements, without affecting their appearance and performance. Among the existing non-destructive methods, the ultrasonic pulse testing has been highlighted. Among the main applications of this method is the evaluation of material homogeneity and the determination of its mechanical properties by means of pulse velocity. However, velocity measurements are sensitive to changes in the properties of the medium, making the behavior of the mechanical wave complex when passing through heterogeneous materials, such as concrete. Therefore, this work aims to evaluate the heterogeneity of concrete through the variation of the velocity of the ultrasonic pulse, using numerical methods. For this, it was evaluated how the main properties of the coarse aggregate influence the measurements of pulse velocities and the Coefficient of Variation (CV). From the results, two equations were developed. The first equation can be used to estimate the ultrasonic pulse velocity in concrete as a function of the volume of aggregates in the mixture. The second equation was developed through the process of data fitting, seeking to understand the behavior of the VC. Based on the results obtained in the numerical simulations it was verified that the difference between the velocity of the particle and the continuum had a relevant impact on the pulse velocity measurements as well as on the CV, this parameter being considered the most important in the study of concrete heterogeneity. Finally, both developed expressions were compared with experimental results in which it was possible to verify the potentiality of their application.

Keywords: heterogeneousness; nondestructive testing; concrete; ultrasound; ultrasonic pulse velocity; coarse aggregates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Variação da velocidade em função da heterogeneidade do concreto. . .	15
Figura 1.2 – Tomografia ultrassônica no concreto.	16
Figura 2.1 – Característica da onda	22
Figura 2.2 – Frequências sonoras - Hz	22
Figura 2.3 – Ondas mecânicas: (a) ondas longitudinais, (b) ondas transversais e (c) ondas de superfícies.	23
Figura 2.4 – Equipamento	24
Figura 2.5 – Arranjo dos transdutores.	25
Figura 2.6 – Efeito do caminho curto.	28
Figura 2.7 – Várias escalas de observação que deve ser considerada no estudo dos materiais e estruturas.	29
Figura 2.8 – Modelos bifásicos para o concreto (a) Modelo de Voigt e (b) Reuss. . .	31
Figura 2.9 – Regime de espalhamento da onda em função do tamanho do grão. . . .	33
Figura 2.10 – Argamassa (a) sem incorporador de ar (b) com incorporador.	35
Figura 2.11 – Velocidade de fase (a) e o coeficiente de atenuação do pulso (b).	36
Figura 2.12 – Velocidade do pulso na argamassa (a) e no modelo micro-mecânico (b). .	37
Figura 2.13 – Velocidade das ondas em função da temperatura (a) e a atenuação da onda (b).	39
Figura 2.14 – Tomografia ultrassônica (a) tomograma de um modelo experimental e (b) numérico.	41
Figura 3.1 – Entrada geométrica (a) e definição das malhas (b).	43
Figura 3.2 – Pontos de medição (a) e trajetórias retilíneas(b): (1) direta, (2) semidi- reta e (3) indireta.	44
Figura 3.3 – Interface atual.	46
Figura 3.4 – Simulação da implementação.	47
Figura 4.1 – Modelo numérico.	52
Figura 4.2 – Valores de RPP para as partículas com diâmetro de: (a) 58.16 mm e (b) 2.60 mm.	53
Figura 4.3 – Gráficos da V_{prop} (a), velocidades médias (b), erro relativo (c) e absoluto (d).	54
Figura 4.4 – Gráficos do CV em função da razão entre áreas (a) e em razão dos diâmetros (b).	55
Figura 4.5 – Gráficos dos valores de CV em função da razão entre áreas e dos diâmetros (a) e o <i>fitting</i> (b).	55
Figura 4.6 – Gráficos do RRP para os diâmetros de 500 e 750 mm, sendo o diâmetro da partícula de 58.16 mm em (a) e (c) e de 2.36 mm em (b) e (d).	56

Figura 4.7 – Gráficos da V_{prop} para o contínuo com diâmetro de 500 mm (a) e 750 mm (b).	57
Figura 4.8 – Gráficos dos valores CV para todos os diâmetros do contínuo (a) e o <i>fitting</i> dos valores (b).	58
Figura 4.9 – Valores de RPP para o contínuo com diâmetro de 250 mm.	59
Figura 4.10–Gráficos das velocidades V_{cont} - 3800 m/s, maior que a V_{part} - (a) 1000, (b) 1700, (c) 2400 e (d) 3100 m/s.	61
Figura 4.11–Gráficos das velocidades do V_{cont} - 3800 m/s, e das partículas de V_{part} - (a) 4500, (b) 5200, (c) 5900 e (d) 6600 m/s.	62
Figura 4.12–Comportamento do CV em função da razão entre as velocidades.	63
Figura 4.13–Gráficos das velocidades V_{part} maior que a V_{cont}	65
Figura 4.14–Gráficos das velocidades V_{part} menor que a V_{cont}	66
Figura 4.15–Fator de forma das partículas: (a) FF=1, (b) FF=2 e (c) FF=3.	67
Figura 4.16–Contínuo de 250 mm com partículas com FF = 2 (a) e FF = 3 (b).	68
Figura 4.17–Gráfico das V_{prop} para partículas com FF = 2 (a) e FF = 3 (b).	68
Figura 4.18–Comportamento dos valores do CV das velocidades em função do FF.	69
Figura 4.19–Comportamento do CV em função do FF = 1 (a), FF = 2 (b) e FF = 3 (c), $V_{cont} = 3800$ e $V_{part} = 6600$ m/s.	70
Figura 4.20–Comportamento do CV em função do FF = 1 (a), FF = 2 (b) e FF = 3 (c), $V_{cont} = 3800$ e $V_{part} = 1000$ m/s.	71
Figura 4.21–Comportamento das funções que compõem o <i>fitting</i>	72
Figura 4.22–Gráfico do termo γ que representa a área tomada pelas partículas.	73
Figura 4.23–Gráfico da razão entre os valores do CV do numéricos e da função proposta, para a V_{cont} maior que a V_{part}	74
Figura 4.24–Gráfico da razão entre os valores do CV do numéricos e da função proposta, para a V_{part} menor que a V_{cont}	74
Figura 4.25–Contínuo de 250 mm com partículas de 26.00 mm (a) trajetórias retilíneas e (b) trajetórias não retilíneas.	76
Figura 4.26–Comportamento do RPP para trajetórias não retilíneas.	76
Figura 4.27–Comportamento da V_{prop} para a trajetórias não retilínea (a) e os valores corrigidos (b).	77
Figura 4.28–Contínuo de 250 mm com partículas de 26.00 e de 11.63 mm em (a) e de 11.63 e 2.60 mm em (b).	78
Figura 4.29–Contínuo de 250 mm com duas partículas de diâmetros distintos em (a) valores de RPP e em (b) as velocidades.	79
Figura 4.30–Razão entre resultado numérico e a função CV obtido em: (a) por β e em (b) por CV.	80
Figura 4.31–Direções de propagação e polarização das ondas ultrassônicas.	81

Figura 4.32–Velocidades para os traços de concreto (a) rico, (b) médio e (c) pobre, moldado na horizontal.	82
Figura 4.33–Velocidades para os traços de concreto (a) rico, (b) médio e (c) pobre, moldado na vertical.	83
Figura 4.34–Seção transversal do concreto: traço (a) rico, (b) médio e (c) pobre. . .	84
Figura 4.35–Resultados numéricos da velocidades considerando os traços de concreto (a) rico, (b) médio e (c) pobre.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Correção da velocidade do pulso devido à temperatura.	27
Tabela 2.2 – Caminho mínimo e dimensão máxima do agregado.	29
Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas dos tipos comuns de rochas.	38
Tabela 3.1 – Traço em massa do concreto e as massas específicas.	47
Tabela 3.2 – Informações das simulações.	49
Tabela 3.3 – Informações sobre as velocidades.	49
Tabela 4.1 – Informações das simulações.	51
Tabela 4.2 – Fitting em função da razão entre as áreas e da razão entre os diâmetros.	55
Tabela 4.3 – Fitting com todos os diâmetros analisados.	58
Tabela 4.4 – Erros relativos e absolutos para cada velocidade das partículas.	61
Tabela 4.5 – Erros relativos e absolutos para cada velocidade das partículas.	63
Tabela 4.6 – Fitting em função da razão entre as velocidades.	65
Tabela 4.7 – Fitting em função da razão entre as velocidades.	66
Tabela 4.8 – Fitting para a V_{part} maior que a V_{cont}	71
Tabela 4.9 – Fitting para a V_{part} menor que a V_{cont}	72
Tabela 4.10–Resultados experimentais de Haach <i>et al.</i> (2021)	81
Tabela 4.11–Resultados numéricos estimados.	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	16
1.3	Metodologia	17
1.4	Conteúdo do trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Ensaios não destrutivos	19
2.2	Visão geral da propagação de ondas mecânicas	21
2.3	Equipamento e fundamentação do ensaio de pulso ultrassônico	24
2.4	Fatores que afetam a velocidade do pulso ultrassônico	26
2.5	Velocidade do pulso ultrassônico no concreto	29
2.6	Heterogeneidade do concreto	29
2.7	Concreto como modelo bifásico	30
2.8	Características físicas da atenuação	33
2.9	Potencialidade do ensaio de pulso ultrassônico na avaliação do concreto	35
3	METODOLOGIA	43
3.1	Software TUSom	43
3.2	Implementações realizadas no TUSom	45
3.3	Exemplos simulados	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	Análise 1 - Razão entre a dimensão máxima da partícula e percurso do pulso ultrassônico	51
4.2	Análise 2 - Diferentes valores de velocidade para as partículas	59
4.3	Análise 3 - Fator de Forma das partículas	67
4.4	Análise 4 - Trajetórias não retilíneas	75
4.5	Análise 5 - Múltiplas partículas	77
4.6	Análise 6 - Discussão com resultados experimentais	80
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
5.1	Conclusões	87
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	88
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

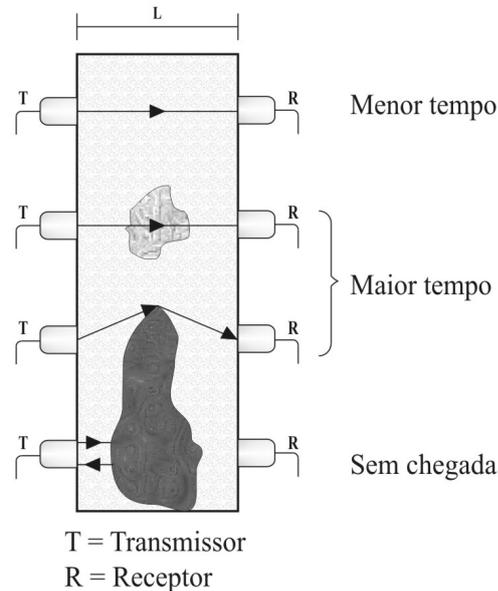
O concreto é o material compósito mais consumido pela humanidade, sendo constituído por uma fase aglomerante na qual se incorporam partículas (grãos e miúdos) que, por sua vez, podem ser de origem natural ou artificial (METHA; MONTEIRO, 2014). As principais características que permitem sua ampla aplicabilidade na construção civil são o baixo custo, a disponibilidade dos seus componentes em todo o mundo, a facilidade de ser obtido em diversas formas e tamanhos, além do desempenho e durabilidade frente aos ambientes agressivos e intempéries.

Por ser o material mais utilizado nos elementos construtivos, é necessário avaliar o estado de segurança e durabilidade das estruturas de concreto, a fim de garantir a funcionalidade e desempenho dos elementos estruturais. O controle das suas propriedades pode ser realizado através dos Ensaio Não Destrutivos (ENDs), que permitem de forma rápida e eficiente avaliar a qualidade do concreto, sem afetar o seu desempenho e aparência (RAMÍREZ, 2015). Os ENDs também têm a vantagem de serem realizados várias vezes no mesmo local ou em regiões próximas, de modo que é possível monitorar as alterações que ocorrem nas propriedades do concreto ao longo do tempo (NEVILLE, 2016).

Dentre os ENDs existentes, o ensaio de ultrassom é um dos métodos mais conhecidos. Tal método envolve a propagação de ondas mecânicas de alta frequência (acima de 20kHz) através do material analisado e, a partir da distância entre os transdutores e com o tempo de propagação do pulso, calculam-se as velocidades, sendo esta medida utilizada como critério na avaliação dos materiais. Os primeiros equipamentos que possibilitaram medir a velocidade dos pulsos foram desenvolvidos em meados da década de 1950, após a Segunda Guerra Mundial, simultaneamente na Inglaterra e no Canadá (CAWFORD, 1997).

Os três principais tipos de ondas mecânicas que podem se propagar em meio sólido, são: as ondas longitudinais, as transversais e as ondas superficiais. Em cada uma delas as características como a amplitude e a velocidade variam de acordo com a heterogeneidade e com possíveis defeitos presentes no interior do material, ou seja, áreas não homogêneas podem ser identificadas através das altas ou baixas medidas de velocidades de propagação, ou pela atenuação da amplitude das ondas mecânicas (RAMÍREZ, 2015). Na figura 1.1, é mostrado um modelo típico de heterogeneidade do concreto determinado pelo ensaio de pulso ultrassônico. No concreto uniforme, os pulsos ultrassônicos passam pelo material num curto intervalo de tempo quando comparado com o concreto que pode apresentar regiões danificadas ou de menor uniformidade. Nessa circunstância, é necessário um intervalo de tempo maior para que o pulso consiga atravessar ou contornar tais irregularidades. Por fim, há situações em que as características e dimensões da anomalia presente no material não permitem que o pulso ultrassônico chegue ao transdutor receptor.

Figura 1.1 – Variação da velocidade em função da heterogeneidade do concreto.



Fonte: Adaptado do ACI 228.2R (2013)).

Nesse sentido, o método de velocidade do pulso ultrassônico pode ser usado para avaliar a uniformidade do concreto e detectar defeitos internos e deterioração devido ao ambiente agressivo como ciclo de gelo e degelo (MALHOTRA; CARINO, 2004). Vale destacar que, apesar dos constantes cuidados durante as etapas de escolha dos materiais, dosagem e produção do concreto, esse material é por natureza heterogêneo e o seu estudo pode ser organizado em três escalas de observações: a microescala, a mesoescala e a macroescala. Na mesoescala, o concreto é descrito como um material composto por agregados e areias, envolvido por uma pasta cimentícia endurecida (aglutinantes) (MIER, 1996). Devido à heterogeneidade do concreto, à distribuição aleatória dos constituintes e às suas propriedades mecânicas e reológicas, o comportamento do pulso ultrassônico tende a ser bastante complexo (KIM; KIM, 2009).

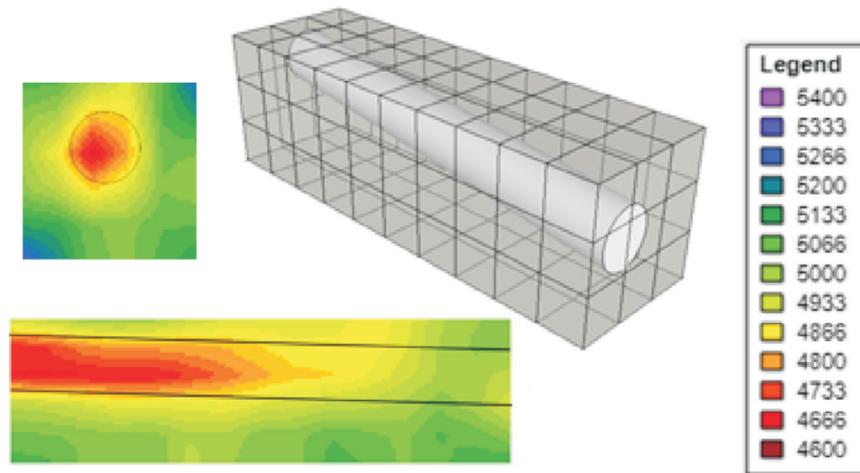
Desse modo, interpretar e compreender como a variação da velocidade está relacionada apenas com a heterogeneidade do concreto é um tema intrigante e desafiador. Sendo o conhecimento deste fenômeno útil para a tomada de decisão dos engenheiros civis, tanto na avaliação da qualidade do concreto quanto nos projetos de recuperação estrutural.

1.1 Justificativa

Uma das principais aplicações do método de pulso ultrassônico é a avaliação da homogeneidade do concreto. Dentre as ferramentas disponíveis, a técnica de tomografia ultrassônica vem sendo desenvolvida e utilizada com bastante êxito na investigação desse parâmetro (HAACH; RAMIREZ, 2016; PERLIN, 2011). Na figura 1.2, pode-se notar que

este método foi capaz de identificar o tamanho e a posição da anomalia presente no interior do concreto (cilindro de Poliestireno Expandido (EPS)) de maneira precisa e satisfatória.

Figura 1.2 – Tomografia ultrassônica no concreto.



Fonte: Haach e Ramirez (2016).

Vale destacar que nesta aplicação (fig. 1.2), os autores já conheciam com antecedência a localização, o tamanho e a natureza da anomalia representada pelo isopor. Porém, em termos práticos, os engenheiros civis não possuem essa informação e estão limitados apenas às medidas de velocidades. Nesse sentido, este trabalho visa investigar até que ponto a variação da velocidade pode ser atribuída apenas à heterogeneidade do concreto ou quando está associada a algum dano em seu interior.

1.2 Objetivos

Geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar a heterogeneidade do concreto na variação da velocidade do pulso ultrassônico. Para atingir o objetivo geral, foram realizados procedimentos de análises numéricas, com os seguintes objetivos específicos:

Específicos

- Efetuar as adaptações necessárias no *software* TUSom para automatizar o lançamento de partículas no contínuo.
- Investigar como as principais características dos agregados graúdos influenciam nas medidas de velocidades do pulso ultrassônico.
- Estudar a variação da velocidade do pulso devido a distribuição aleatória das partículas no contínuo.

- Desenvolver equações que descreva o comportamento da velocidade e do coeficiente de variação (CV) do pulso ultrassônico.

1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi feito um levantamento bibliográfico sobre os ensaios não destrutivos aplicados nas estruturas de concreto, com ênfase no método de velocidade do pulso ultrassônico (*Ultrasonic Pulse Velocity – UPV*). Posteriormente, foi realizada uma busca por trabalhos que discutem a heterogeneidade do concreto e como essa característica é avaliada através da velocidade do pulso ultrassônico.

O progresso da pesquisa conta com o desenvolvimento e implementação de um código computacional escrito em linguagem Pascal, utilizando a plataforma de programação IDE Lazarus. A modificação proposta neste trabalho foi feita no *software* TUSom desenvolvido pelo Prof. Dr. Vladimir Guilherme Haach, do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, São Carlos.

A etapa de pré-processamento do TUSom, que consiste em definir a geometria da seção transversal e o tipo de malha a serem utilizados nas simulações, foi previamente desenvolvida no *software*. Dentro dessa etapa, foram realizadas adaptações, visando automatizar a distribuição das partículas no contínuo, a partir de uma determinada curva granulométrica. Com a elaboração e a implementação do código, foram analisadas numericamente a influência das principais propriedades dos agregados graúdos, tais como: diâmetro das partículas, origem mineralógica, índice de forma e a distribuição granulométrica nas variações das velocidades dos pulsos.

Por fim, foi feito um estudo confrontando os resultados obtidos por meio das expressões desenvolvidas neste trabalho com os resultados obtidos no trabalho de (HAACH *et al.*, 2021), buscando compreender como as diferentes composições do concreto, assim como as suas propriedades físicas influenciam nas medidas de variações das velocidades. Com base nesse estudo, foram elaboradas conclusões pertinentes sobre o tema em questão.

1.4 Conteúdo do trabalho

O conteúdo do presente trabalho é composto dos seguintes capítulos: introdução, revisão bibliográfica, metodologia, resultados e discussão e por fim as considerações finais. A seguir é descrito de forma sucinta as principais atividades desenvolvidas em cada capítulo.

- No capítulo 2, relativo à revisão bibliográfica, são apresentados os ensaios não destrutivos e como estes métodos são utilizados na análise das propriedades mecânicas do concreto. Em seguida, é detalhado o ensaio de pulso ultrassônico descrevendo os conceitos básicos da propagação de ondas mecânicas em sólidos, a fundamentação

e os equipamentos utilizados nesse ensaio. Por fim, é apresentado o conceito de atenuação das ondas em meios heterogêneos e a capacidade do ensaio de pulso ultrassônico na avaliação da homogeneidade do concreto.

- No capítulo 3, são abordados o funcionamento do *Software TUSom* e a implementação realizada em linguagem Pascal, tendo como objetivo principal automatizar a distribuição das partículas no contínuo seguindo uma determinada curva granulométrica. Na sequência, são explicados os exemplos que foram os objetos de estudo deste trabalho.
- O capítulo 4, relacionado aos resultados e discussões, aborda as principais características das partículas e como esses parâmetros influenciam nos valores das medidas das velocidades e dos desvios padrão. Tendo como proposta a formulação de equações para a velocidade e para o Coeficiente de Variação (CV) buscando correlacionar os parâmetros analisados com os resultados obtidos nas simulações.
- No capítulo 5, denominado de considerações finais, são apresentadas as conclusões deste trabalho, além das propostas para trabalhos futuros a partir dos estudos realizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os ensaios não destrutivos utilizados na engenharia civil e suas principais aplicações em estruturas de concreto. Uma abordagem mais detalhada é feita para o método de velocidade do pulso ultrassônico, que inclui os princípios físicos do ensaio, os equipamentos utilizados e os cuidados necessários durante a execução do teste. Em seguida, são discutidos os principais fatores que influenciam a variação da velocidade do pulso, com foco na heterogeneidade do concreto. Por fim, são apresentadas brevemente duas técnicas promissoras: a tomografia e a acustoelasticidade.

2.1 Ensaios não destrutivos

Tradicionalmente, o controle tecnológico do concreto é realizado por inspeção visual durante a fase de concretagem e, em seguida, é feita a coleta de amostras, que serão utilizadas em ensaios padronizados no estado fresco e endurecido (ABNT NBR 16889, 2020; ABNT NBR 5738, 2016; ABNT NBR 5739, 2018). No entanto, essa abordagem não permite obter informações sobre a homogeneidade do concreto quando a estrutura está em serviço. Nesse sentido, os ENDS oferecem como vantagem avaliar as propriedades do concreto endurecido em locais específicos das estruturas existentes e, desta forma, obter informações importantes sobre o concreto, tais como constantes elásticas, densidade, resistividade, teor de umidade e características de permeabilidade (ACI 228.2R, 2013).

Além disso, em grandes estruturas, o custo para a remoção de amostras que serão utilizadas no ensaio de compressão pode ser muito caro, e quando realizados em pequenas quantidades, esses ensaios podem produzir resultados inconsistentes sobre o desempenho das estruturas. Nesse sentido, os ENDS podem ser associados e utilizados em análises preliminares para seleção de amostras representativas, resultando numa quantidade menor de ensaios destrutivos e aumentando o nível de confiança dos resultados (IAEA, 2002; DÉROBERT; AUBAGNAC; ABRAHAM, 2002).

Os ENDS são técnicas que permitem avaliar as características dos materiais e das estruturas sem causar danos significativos. De acordo com o Instituto Americano de Concreto (ACI 228.2R, 2013), esses métodos podem ser utilizados para determinar propriedades do concreto endurecido e avaliar as condições do concreto em fundações profundas, pavimentos, barragens, pontes e outras construções de concreto. Os ensaios não destrutivos são vistos como uma ferramenta promissora, pois permitem o monitoramento e o controle de qualidade do concreto com economia de tempo e recursos. Vale ressaltar que, graças a essas técnicas, é possível avaliar a integridade das estruturas de concreto sem comprometê-las, detectando falhas, defeitos superficiais e internos, descontinuidades e fraturas que afetam a vida útil das construções.

De acordo com a ACI 228.2R (2013), os ENDs estão ganhando cada vez mais espaço na avaliação das estruturas de concreto, e esse aumento se deve aos seguintes fatores:

- Melhorias tecnológicas de Hardware e Software para a coleta e processamentos de dados;
- Vantagens econômicas na avaliação de grandes volumes de concreto quando comparada a ensaios que necessitam de retirada de amostras;
- Capacidade de avaliação rápida e abrangente de construções existentes;
- Especificações de métodos de ENDs para garantir a qualidade de fundações profundas e reparos de estruturas de concreto.

Os ENDs podem ser classificados em duas categorias: ensaios parcialmente destrutivos e os ensaios verdadeiramente não destrutivos. No primeiro caso, ocorrem alguns danos superficiais, que geralmente podem ser reparados após o ensaio. Já no segundo caso, não há nenhum dano à estrutura, e as medidas das propriedades dos materiais são obtidas através de resposta a estímulos característicos de cada método. A seguir, serão apresentados resumidamente alguns ensaios não destrutivos aplicados no concreto.

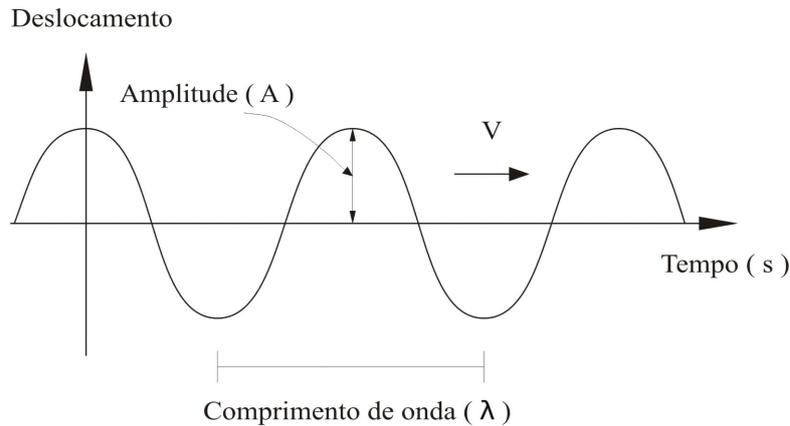
- Ensaio de arrancamento (Pull-out): o ensaio consiste no arrancamento de uma peça metálica com dimensões previamente estabelecidas, embutida no concreto. A carga final necessária para o arranque é utilizada para estimar a resistência à compressão do concreto no local (MALHOTRA; CARINO, 2004).
- Resistência à penetração: nesse método, a resistência à compressão do concreto pode ser estimada através da profundidade de penetração de sondas (hastes de aço ou pinos) cravada na superfície da estrutura, para isso utiliza-se uma pistola ativada à base de pólvora (NEVILLE, 2016).
- Inspeção visual: as informações obtidas nesse método dão um indicativo preliminar da condição da estrutura e permitem formular um plano de testes subsequentes que conduzirá a uma análise mais aprofundada do problema. Algumas características do concreto obtidas por meio dessa análise incluem: fissuras, desintegração do concreto, manchas superficiais, armaduras expostas, entre outras (IAEA, 2002).
- Esclerômetro de Schmidt: o ensaio é baseado no princípio de reflexão de uma massa que colide com a superfície da estrutura de concreto, tendo como resultado o 'índice esclerométrico'. A partir desse valor é possível estimar a resistência à compressão do concreto através de uma curva de correlação, desenvolvida para essa finalidade (NEVILLE, 2016).

- Radar de penetração: essa técnica se baseia na propagação de ondas eletromagnéticas e tem sido utilizada em estruturas de concreto para detectar vazios, localizar barras de aço, medir o teor de umidade e determinar a espessura de pavimento (METHA; MONTEIRO, 2014).
- Eco – Impacto: nesse método, um receptor adjacente ao ponto de impacto monitora as chegadas das ondas de tensão, na medida em que sofrem múltiplas refrações entre regiões com diferentes propriedades. Dessa forma, é possível determinar defeitos internos ou descontinuidade do concreto através da análise de frequência e da velocidade da onda longitudinal (IAEA, 2002).
- Resistividade elétrica: esse ensaio tem como objetivo principal determinar a resistividade do concreto, sendo um importante parâmetro da estrutura de concreto armado. Concreto com alta resistividade tem pouca possibilidade de desenvolver corrosão nas armaduras. Em campo, esse ensaio é realizado com auxílio de equipamentos que permitem medir a diferença de potencial na superfície do concreto (METHA; MONTEIRO, 2014).
- Método de velocidade do pulso ultrassônico: esse método consiste em determinar a velocidade de propagação do pulso ultrassônico no meio sólido. Conhecendo-se a distância entre os transdutores e o tempo de viagem do pulso, a velocidade pode ser então calculada. Entre as principais aplicações desse método estão a verificação da homogeneidade do concreto; detecção de eventuais falhas de concretagem, fissuras e imperfeições; e o monitoramento das propriedades do concreto ao longo do tempo, devido à agressividade do meio (ABNT NBR 8802, 2019). Os conceitos físicos necessários para entender o funcionamento desse método, bem como a análise da homogeneidade do concreto por meio da velocidade do pulso, são estudados nos itens a seguir.

2.2 Visão geral da propagação de ondas mecânicas

Ondas mecânicas são perturbações oscilantes no meio que transmite energia entre dois pontos sem transporte de matéria. Existentes apenas em meios materiais, como gases, líquidos e sólidos, e são regidas pelas Leis de Newton (HALLIDAY; RESNICK, 2016). As principais características físicas que caracterizam as ondas são: a amplitude (A), o comprimento de onda (λ), e a frequência (f), conforme a figura 2.1.

Figura 2.1 – Característica da onda



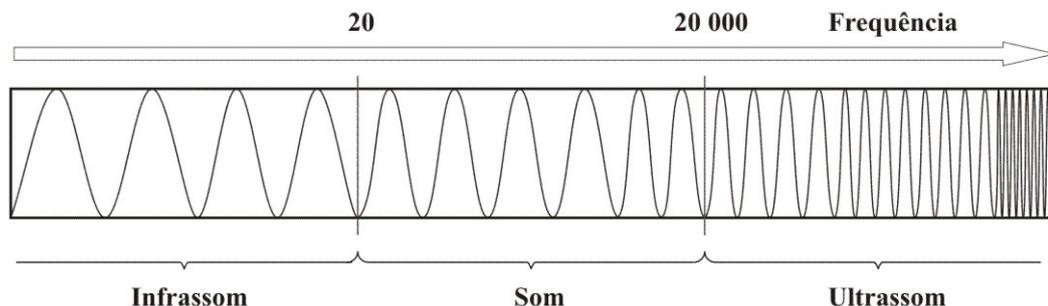
Fonte: Autor.

A velocidade da onda pode ser expressa em função do comprimento de onda (λ) e da frequência (f) de acordo com a Equação 2.1.

$$V = f\lambda \quad (2.1)$$

O ensaio de pulso ultrassônico consiste na propagação de ondas mecânicas de alta frequência, superior a 20 kHz, através do meio a ser analisado. As ondas mecânicas podem ser geradas com frequência que se situam num grande intervalo de valores, sendo: o infrassom, com frequência de vibração inferior a 20 Hz, e o som, com frequência entre 20 Hz e 20 kHz, sendo essa faixa de frequência que define o limite de audibilidade humana. E por fim, o ultrassom com frequência de acima de 20 kHz (ANDREUCCI, 2011). Na figura 2.2 é apresentado o espectro de frequências sonoras.

Figura 2.2 – Frequências sonoras - Hz

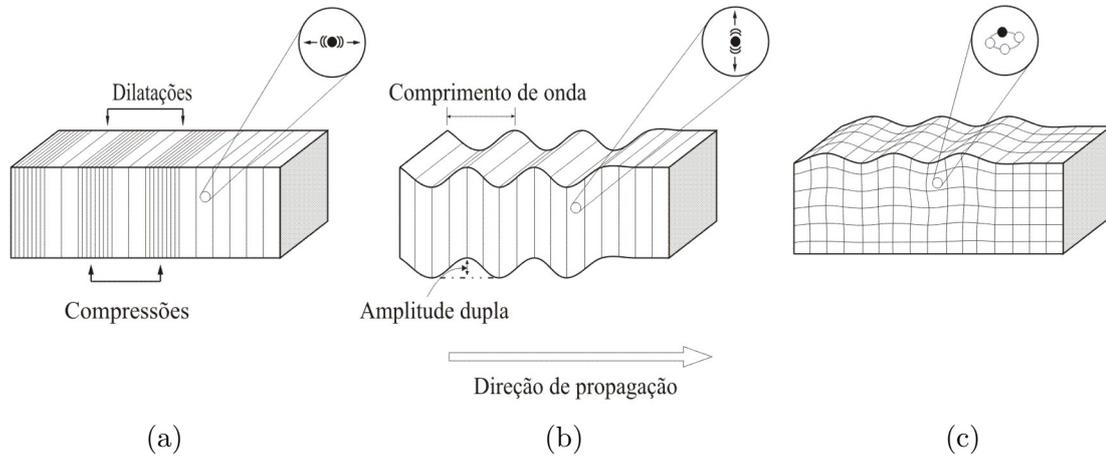


Fonte: Autor.

A propagação da onda mecânica em meios sólidos faz com que as partículas que o compõem realizem movimentos oscilantes em torno da sua posição de equilíbrio. Nesse cenário, surgem tensões internas que atuam para restaurar as partículas às suas posições originais. As ondas mecânicas podem ser classificadas de acordo com a direção de vibração

das partículas em relação à direção do movimento da onda, sendo as principais: ondas longitudinais, ondas transversais e ondas de superfícies (figura 2.3).

Figura 2.3 – Ondas mecânicas: (a) ondas longitudinais, (b) ondas transversais e (c) ondas de superfícies.



Fonte: Adaptado de Metha e Monteiro (2014).

Nas ondas longitudinais as partículas se movem na mesma direção de propagação da onda, gerando regiões sucessivas de tração e compressão no meio, fig.2.3 (a). Por serem as mais rápidas, são conhecidas como ondas primárias ou *p-waves* (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002). Já nas ondas transversais, as partículas se movimentam na direção perpendicular à direção de propagação da onda, provocando tensões de cisalhamento, fig. 2.3 (b). Essas ondas são incapazes de se propagarem em líquidos e gases, devido à natureza das ligações nesses meios (ANDREUCCI, 2011). Também são conhecidas como shear-wave ou *s-waves*. A onda de Rayleigh é um tipo de onda superficial que pode ser entendida como uma combinação das ondas longitudinais e transversais, fig. 2.3 (c), resultando num movimento elíptico das partículas do meio (METHA; MONTEIRO, 2014).

No material isotrópico, homogêneo e elástico linear, a velocidade da onda longitudinal e transversal pode ser expressa de acordo com as equações 2.2 e 2.3, respectivamente.

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (2.2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (2.3)$$

Onde:

- E = módulo de elasticidade dinâmico;
- ρ = massa específica;
- ν = coeficiente de Poisson.

A velocidade da onda de Rayleigh ou *r-waves*, para o material ideal é representada de forma aproximada pela Equação 2.4, segundo Viktorov (1967)¹ *apud* Malhotra e Carino (2004).

$$V_r = V_s \cdot \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad (2.4)$$

Onde:

V_r = velocidade da onda de Rayleigh;

V_s = velocidade da onda transversal;

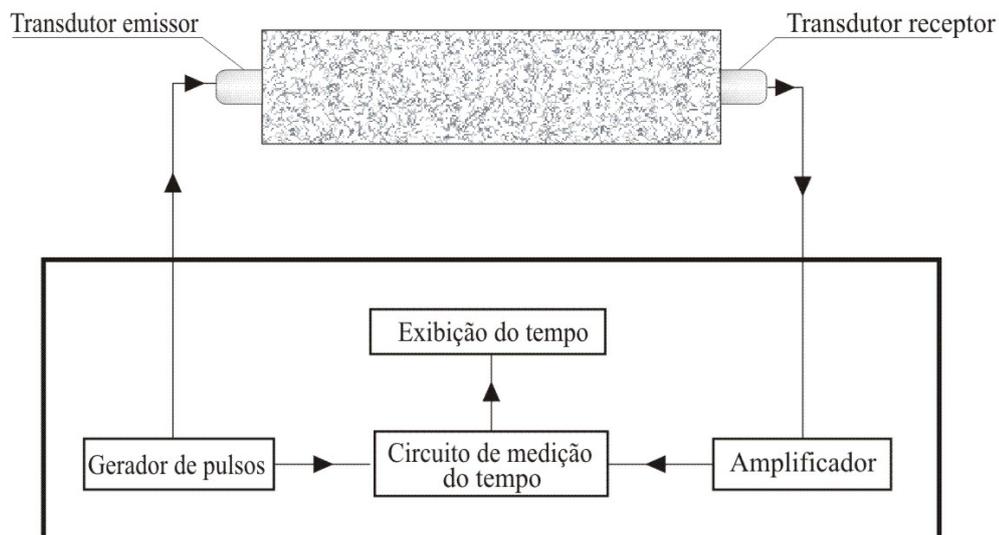
ν = coeficiente de poisson.

Cada onda se propaga com sua velocidade característica. Para o mesmo sólido, as ondas de compressão apresentam as maiores velocidades enquanto as de superfícies as menores. No concreto, com coeficiente de poisson igual a 0,2, as velocidades das ondas de cisalhamento e de superfícies são de aproximadamente 60% e 55% da velocidade da onda longitudinal, respectivamente (ACI 228.2R, 2013).

2.3 Equipamento e fundamentação do ensaio de pulso ultrassônico

O equipamento utilizado para realizar o ensaio de ultrassom consiste de um gerador de pulsos, um par de transdutores (emissor e receptor de sinal), um amplificador, um circuito de medição do tempo, uma unidade de exibição de tempo e cabos de conexão (ASTM C597- 09, 2009). Um modelo esquemático do equipamento é apresentado na figura 2.4.

Figura 2.4 – Equipamento



Fonte: Adaptado de ASTM C597- 09 (2009).

¹ Viktorov, I., Rayleigh and Lamb Waves, translated by W.P. Mason, Plenum Press, New York, 1967.

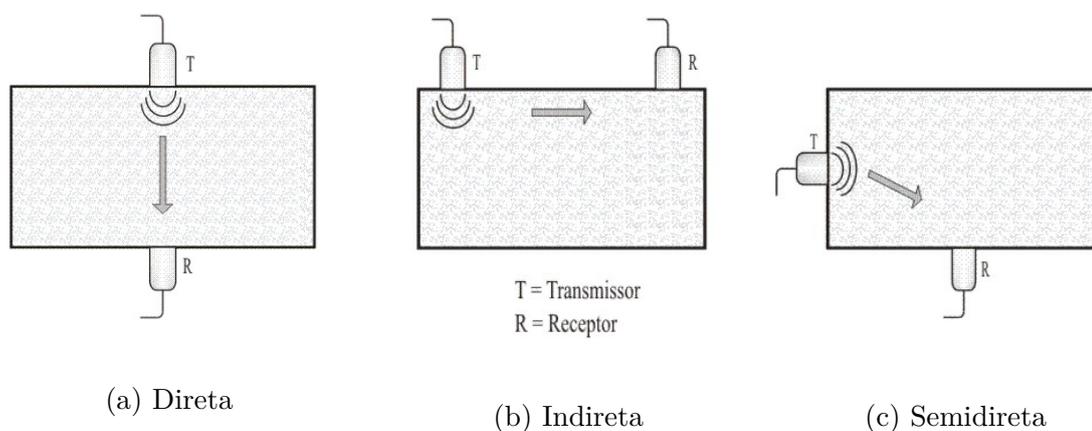
O ensaio de ultrassom pode ser realizado por meio de duas técnicas distintas: pulso-eco e transparência. No primeiro método, um transdutor emite o pulso que atravessa o material analisado, sendo captado pelo mesmo ou por outro transdutor. A partir da medida de tempo, é possível determinar a profundidade da descontinuidade presente no elemento. Na técnica de transparência, utilizam-se necessariamente dois transdutores, que estão posicionados a uma distância conhecida. A partir da medida do tempo de viagem do pulso, calcula-se então a velocidade de propagação. Este trabalho tem como foco o ensaio de ultrassom utilizando a modalidade de transparência.

Os transdutores utilizados no ensaio de ultrassom podem ser constituídos por materiais piezoelétricos, magnetostritivos, ou outro material sensível à voltagem (ASTM C597- 09, 2009), sendo os mais comuns os transdutores piezoelétricos.

No ensaio de pulso ultrassônico, as ondas mecânicas são introduzidas no material em análise através do transdutor emissor que converte os pulsos de corrente elétrica alternada, gerados pelo gerador de pulsos, em ondas mecânicas oscilantes (ANDREUCCI, 2011). Esse fenômeno ocorre graças à presença de um material com propriedades piezoelétricas presente nos transdutores. O processo reverso também ocorre, ou seja, o transdutor receptor é capaz de detectar as vibrações mecânicas e convertê-las em pulsos elétricos, que são amplificados e enviados para o circuito de medição. Por fim, o tempo de viagem é mostrado no display de exibição de tempo (ASTM C597- 09, 2009). Segundo Andreucci (2011), a frequência ultrassônica dependerá da espessura do cristal piezoelétrico presente nos transdutores. Quanto menor a espessura maior a frequência de vibração.

A ABNT NBR 8802 (2019) descreve três possíveis tipos de arranjos dos transdutores para a realização do ensaio de transparência, sendo: transmissão direta, transmissão indireta e a transmissão semidireta (figura 2.5).

Figura 2.5 – Arranjo dos transdutores.



A transmissão direta é o arranjo entre os transdutores mais recomendado para a determinação da velocidade do pulso ultrassônico. Nessa configuração, as ondas são recebidas com maiores intensidades e a distância entre os transdutores é determinada com maior precisão. O arranjo de transmissão indireta é utilizado quando apenas uma face do elemento ou corpo de prova está acessível. Essa face, por sua vez, deve ter comprimento suficiente para proporcionar o deslocamento transdutor-receptor (ABNT NBR 8802, 2019; PUNDIT, 2017). O esquema de transmissão semidireta pode ser utilizado de forma satisfatória. No entanto, deve-se ter cuidado para que os transdutores não fiquem muito distantes um do outro, pois podem ocorrer perdas significativas da energia e o sinal do pulso não ser detectado (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Quando um pulso ultrassônico de ondas longitudinais atravessa o concreto, surge um sistema de múltiplas reflexões nos limites das diferentes fases que compõem o concreto. Nesse sentido, um complexo sistema de ondas de tensão é formado, incluindo ondas longitudinais e ondas de cisalhamento. As primeiras ondas que chegam ao transdutor receptor são as ondas longitudinais (IAEA, 2002). Com a medida de tempo obtida pelo circuito temporizador e a distância entre os transdutores a velocidade do pulso ultrassônico pode ser determinada, a partir da Equação 2.5.

$$V = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (2.5)$$

Onde:

V = velocidade do pulso;

Δs = distância percorrida pelo pulso;

Δt = tempo do percurso do pulso.

Durante o ensaio de ultrassom, deve-se ter cuidado com a superfície de contato entre os transdutores e o concreto. Segundo Malhotra e Carino (2004), uma fina camada de acoplante deve ser aplicada nessa área para eliminar as bolhas de ar que podem introduzir erros na leitura do tempo. Esses erros ocorrem porque uma pequena quantidade da energia das ondas pode ser transmitida pelo ar. Para garantir o acoplamento adequado entre o elemento em análise e os transdutores utiliza-se um material acoplante como, por exemplo: gel médico, graxa, silicone, vaselina, entre outros. Se a superfície do concreto for rugosa, a mesma deve ser regularizada através de processos mecânicos ou com uma camada de pasta de cimento, gesso ou resina epóxi, com espessura mínima que permita um bom acoplamento dos transdutores (ABNT NBR 8802, 2019).

2.4 Fatores que afetam a velocidade do pulso ultrassônico

O ensaio de pulso ultrassônico é relativamente simples de realizar, porém, é importante manter alguns cuidados durante a execução do ensaio para que as variações de velocidade sejam influenciadas apenas pelas propriedades do material em análise (MALHOTRA; CARINO, 2004). A heterogeneidade do concreto é um dos principais fatores que afetam a velocidade do pulso

ultrassônico, que, por sua vez, está relacionado com a qualidade do concreto. Desta forma, as medidas de velocidades fornecem um meio de estudar a heterogeneidade desse material. Para isso é necessário criar um sistema de pontos de medição que cubra uniformemente a superfície do concreto a ser analisada (IAEA, 2002).

Os fatores que afetam a interpretação dos resultados da velocidade do pulso ultrassônico podem ser divididos em duas categorias, sendo: fatores relacionados à condição ou estado em que o concreto se encontra e, no segundo caso, fatores diretamente associados com as propriedades mecânicas do concreto (MALHOTRA; CARINO, 2004). A seguir serão apresentados alguns fatores da primeira categoria. Já a segunda classe será discutida com mais detalhes no item 2.5.

- Temperatura do concreto

Segundo Jones e Facaoaru (1969), temperaturas entre 5 e 30 °C não afetam a velocidade do pulso ultrassônico medidas no concreto. Para temperaturas mais altas e mais baixas, mudanças na velocidade do pulso são observadas tanto no concreto seco quanto no concreto saturado. Na tabela 2.1, são apresentadas as correções para a velocidade do pulso em função da temperatura.

Tabela 2.1 – Correção da velocidade do pulso devido à temperatura.

Temperatura (C°)	Correção (%)	
	Concreto seco	Concreto saturado
60	+5	+4
40	+2	+1.7
20	0	0
0	-2	-1
Abaixo de -4	-1.5	-7.5

Fonte: Jones e Facaoaru (1969).

A redução na velocidade do pulso para temperaturas acima de 30 °C ocorre devido ao surgimento de microfissuras internas no concreto. Por outro lado, o aumento na velocidade em temperaturas abaixo de 0 °C está relacionado ao congelamento da água presente nos poros do concreto. Isso se deve ao fato que a velocidade das ondas mecânicas nos sólidos é maior que nos meios líquidos.

- Umidade

A velocidade do pulso ultrassônico no concreto saturado pode ser até 5 % maior que no concreto seco. No caso do concreto de alta resistência, a umidade possui menor influência, devido a sua menor porosidade (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006). A diferença nos valores das velocidades pode ser explicada pela presença de água livre nos vazios do concreto. Nesse sentido, é importante considerar o impacto da umidade durante a realização do ensaio de ultrassom.

- Presença de armaduras

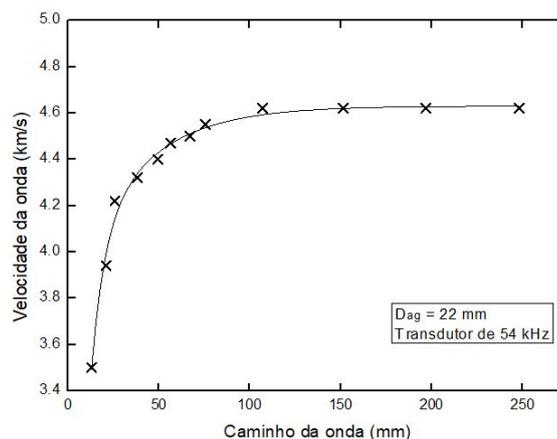
A velocidade do pulso ultrassônico é significativamente afetada pelas barras de aço no concreto, pois a velocidade do pulso no aço é cerca de 1,4 a 1,7 maior que no concreto simples.

Portanto, as medidas de velocidade obtidas em áreas com altas taxas de armaduras apresentam valores mais elevados. Sempre que possível, as leituras das velocidades devem ser executadas de tal forma que os reforços sejam evitados como caminho "preferencial" do pulso. Caso contrário, um fator de correção para a velocidade deve ser usado (MALHOTRA; CARINO, 2004).

- Comprimento do percurso

Teoricamente, a velocidade do pulso ultrassônico não é afetada pela distância dos transdutores. No entanto, para o concreto, os caminhos de onda muito curtos são afetados pela heterogeneidade, que tende a fornecer valores de velocidade mais variáveis e ligeiramente maiores (Jones (1962) *Apud* Malhotra e Carino (2004)). Entretanto, Bungey (1980) verificou em seu trabalho que, quando o caminho da onda foi reduzido por um processo de serragem do concreto, os valores das velocidades diminuíram, como mostrado na figura 2.6. A discrepância nos valores das velocidades para pequenas distâncias ocorre devido à natureza heterogênea do concreto. Nesse sentido, a norma britânica BS 12504 : Part 4 (2004) recomenda comprimento mínimo de 100 mm para concreto com agregados de dimensão máxima ou inferior a 20 mm; e 150 mm para concreto com tamanho de dimensão máxima entre 20 e 40 mm.

Figura 2.6 – Efeito do caminho curto.



Fonte: Adaptado de Bungey (1980).

Segundo Bungey, Millard e Grantham (2006), a escolha da frequência do transdutor está relacionada ao tamanho mínimo do componente a ser analisado. A dificuldade surge na análise de pequenas amostras, quando o caminho de onda é menor que o comprimento de onda, como já discutido anteriormente. Nesse sentido a tabela 2.2 lista as dimensões mínimas que devem ser atendidas durante a realização do ensaio de pulso ultrassônico, considerando a velocidade no concreto de 3800 m/s e 4600 m/s.

Tabela 2.2 – Caminho mínimo e dimensão máxima do agregado.

Frequência do transdutor (kHz)	Dimensão mínima do caminho de onda (ou diâmetro máximo do agregado - mm)	
	V = 3800 m/s	V = 4600 m/s
54	70	85
82	46	56
150	25	30

Fonte: (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006).

De acordo com a Equação 2.1, para caminho curto é recomendado utilizar outro transdutor de maior frequência para reduzir o comprimento de onda de tal forma que o critério do caminho de onda seja atendido. No entanto, o tamanho máximo do agregado deve ser menor que o comprimento de onda para evitar a redução da energia do pulso a ponto de um sinal não ser detectado pelo transdutor receptor (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006).

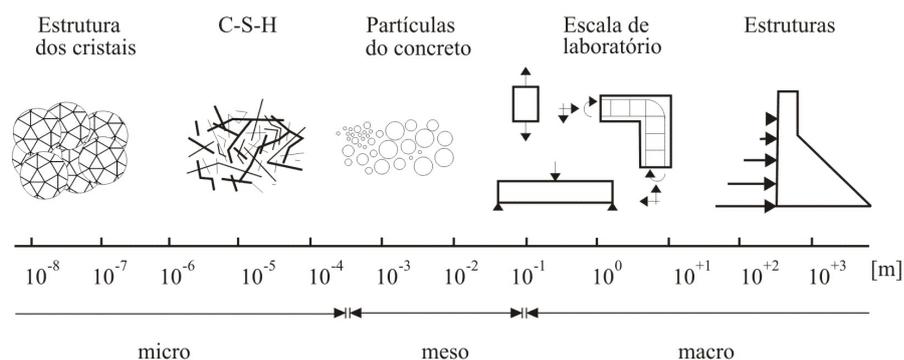
2.5 Velocidade do pulso ultrassônico no concreto

Interpretar como a variação da velocidade do pulso ultrassônico está associada apenas à heterogeneidade do concreto é um tema intrigante, pois as diferentes propriedades mecânicas dos seus constituintes e sua à distribuição aleatória tornam o comportamento da onda complexo (PRASSIANAKIS; GIOKAS, 2003). Devido a esse fato, os tópicos a seguir se propõem a estudar como a heterogeneidade do concreto altera as principais características do pulso.

2.6 Heterogeneidade do concreto

Em muitos modelos clássicos, os materiais utilizados na engenharia são representados como um contínuo, e o seu comportamento pode ser descrito independente da estrutura interna do material. Apesar disso, é possível construir um diagrama multi-escalar para distinguir as principais características do material em cada nível de observação (MIER, 1996). Na figura 2.7, é feita esta representação para o concreto.

Figura 2.7 – Várias escalas de observação que deve ser considerada no estudo dos materiais e estruturas.



Fonte: Adaptado de Mier (1996).

Conforme mostrado na figura 2.7, o concreto é um material heterogêneo e complexo em várias escalas. Devido a esse fato, um método útil vem sendo utilizado no desenvolvimento de pesquisa em materiais, focando principalmente em três níveis de observação, sendo: micro, meso e macroescala.

Na microescala, a estrutura interna do cimento e da pasta de cimento endurecido são as características mais importantes. Na mesoescala, o concreto é formado pela matriz de pasta de cimento endurecida, inclusões de agregados graúdos e miúdos, zona de transição interfacial (ZTI) e uma estrutura complexa de poros. Ao nível macro, o concreto é considerado um material homogêneo e o seu comportamento é descrito independente da sua estrutura interna (MIER, 1996; CONSTANTINIDES; ULM, 2004).

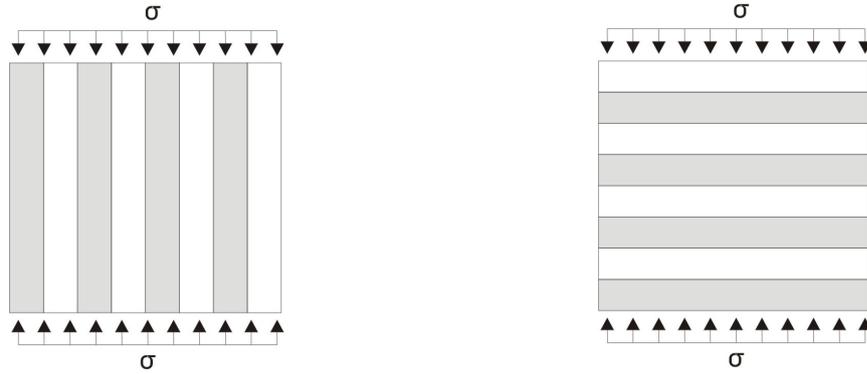
Os materiais a base de cimento são altamente atenuantes, e isso se deve à natureza viscoelástica da pasta; e à perda de energia ocorre devido ao espalhamento do pulso ultrassônico por vários tipos de inclusões, tais como: os agregados (graúdos e miúdos), vazios de ar e microfissuras (PUNURAI *et al.*, 2006). Conhecendo-se a complexidade desse material, alguns modelos empíricos são utilizados para estimar as propriedades mecânicas do concreto, descrevendo esse material por meio de modelos bifásicos, composto pela argamassa e os agregados, como discutido no item 2.7.

2.7 Concreto como modelo bifásico

Como já foi abordado anteriormente, a velocidade do pulso ultrassônico depende das propriedades mecânicas dos meios pelo qual a onda se propaga. O concreto possui uma composição bem complexa e a determinação das suas propriedades mecânicas são de interesse nas fases preliminares de projetos. Muitas destas propriedades são determinadas por meio de relações empíricas que são usadas para estimar as propriedades finais do concreto por meio das propriedades mecânicas dos seus constituintes.

Entre os modelos empíricos mais simples para simular um material compósito estão o de Voigt (1889) e o de Reuss (1929). No primeiro caso, o compósito final é formado por dois constituintes, que estão associados em paralelos, figura 2.8 (a). A condição de compatibilidade que deve ser atendida ocorre por meio das deformações iguais e simultâneas em cada componente. Assim, a soma das tensões em cada componente é igual à tensão total aplicada. Já no segundo modelo, as fases estão associadas em série, figura 2.8 (b), e a deformação total pode ser obtida pela soma das deformações de cada componente, já as tensões são iguais para todas as fases. A lei constitutiva que rege o comportamento de ambos os modelos é o regime linear de deformações, sendo análogo a um sistema de mola (METHA; MONTEIRO, 2014).

Figura 2.8 – Modelos bifásicos para o concreto (a) Modelo de Voigt e (b) Reuss.



(a)

(b)

Fonte: Adaptado de Metha e Monteiro (2014).

A partir das equações de compatibilidade, lei constitutiva e de equilíbrio é possível apresentar a formulações para o cálculo dos módulos de elasticidade do concreto. Admitindo que o concreto possa ser representado por um modelo bifásico, composto pela matriz cimentícia e por agregados. As equações 2.6 e 2.7, representam as expressões de Voigt e Reuss, respectivamente.

$$E = E_1 c_1 + E_2 c_2 \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \quad (2.7)$$

Onde:

E_{eq} = Módulo de elasticidade do compósito;

E_1 = Módulo de elasticidade do componente 1;

E_2 = Módulo de elasticidade do componente 2;

c_1 = Fração volumétrica da fase 1;

c_2 = Fração volumétrica da fase 2.

Ainda segundo Metha e Monteiro (2014), os modelos de Voigt e Reuss são utilizados como estimativas no cálculo do módulo de elasticidade. No primeiro caso, a suposição das tensões iguais nos elementos atende somente as equações de equilíbrio porém irá ocorrer deslocamentos descontínuos nas interface das faces. Já no segundo modelo, a suposição de deslocamentos iguais implicará em concentração de tensões nas interfaces. Além disso, os valores dos módulos de elasticidade encontrados nos modelos anteriores são considerados situações limites, sendo o limite superior (Voigt) e o inferior (Reuss) e, em algumas aplicações, esses valores podem se diferir bastante, não possibilitando emprego na prática.

Nesse sentido, Hashin e Shtrikman (1963), desenvolveram um modelo baseado no princípio variacional da teoria da elasticidade que permite calcular os limites para os valores dos módulos

de elasticidade com mais rigor, independente da geometria das fases, tornando esse método mais rigoroso. A seguir, são representadas as expressões para o compósito bifásico. Onde, K e G , representam o módulo de volumétrico e de cisalhamento, respectivamente.

$$K_{low} = K_1 + \frac{c_2}{\frac{1}{K_2 - K_1} + \frac{3c_1}{3K_1 + 4G_1}} \quad K_{up} = K_2 + \frac{c_1}{\frac{1}{K_1 - K_2} + \frac{3c_2}{3K_2 + 4G_2}} \quad (2.8)$$

$$G_{low} = G_1 + \frac{c_2}{\frac{1}{G_2 - G_1} + \frac{6(K_1 + 2G_1)c_1}{5G_1(3K_1 + 4G_1)}} \quad G_{up} = G_2 + \frac{c_1}{\frac{1}{G_1 - G_2} + \frac{6(K_2 + 2G_2)c_2}{5G_2(3K_2 + 4G_2)}} \quad (2.9)$$

Sendo o $K_2 > K_1$ e o $G_2 > G_1$, onde os índices 1 e 2 correspondem às fases 1 e 2, respectivamente. Os valores calculados para K_{low} e G_{low} referem-se aos limites inferiores, assim como, os valores de K_{up} e G_{up} aos limites superiores. A partir dos valores encontrados nas expressões 2.8 e 2.9 podem-se calcular os limites para o módulo de elasticidade E por meio da expressão 2.10 utilizada para materiais isotrópicos.

$$E = \frac{9KG}{3K + G} = 2G(1 + \nu) = 3K(1 - 2\nu) \quad (2.10)$$

Onde ν é o coeficiente de Poisson. Com base nos valores limites dos módulos de elasticidade [$E_{low}; E_{up}$] pode-se adotar o módulo de elasticidade do concreto desde que contido nesse intervalo. Além dos modelos de Voigt (1889), Reuss (1929) e Hashin e Shtrikman (1963), serão apresentados no quadro 2.1 de maneira sucinta os modelos bifásicos de outros pesquisadores e a suas respectivas formulações matemáticas para estimativa do módulo de elasticidade.

Quadro 2.1 – Modelos compósitos bifásicos (METHA; MONTEIRO, 2014)

Hihirsch (1962)	
	$\frac{1}{E_{eq}} = (x - 1) \left(\frac{c_a}{E_a} + \frac{1 - c_a}{E_m} \right) + x \left(\frac{1}{c_a E_a + (1 - c_a) E_m} \right) \quad (2.11)$
Counto (1964)	
	$\frac{1}{E_{eq}} = \left(\frac{1 - \sqrt{c_a}}{E_m} \right) + \frac{1}{\left(\frac{1 - \sqrt{c_a}}{\sqrt{c_a}} \right) E_m + E_a} \quad (2.12)$
Hansen (1965)	
	$E_{eq} = \left(\frac{c_m E_m + (1 + c_a) E_a}{(1 + c_a) E_m + c_m E_a} \right) E_m \quad (2.13)$

Em que: x e $(x-1)$, são as contribuições relativas entre os modelos de Voigt e Reuss, respectivamente. E_m e E_a , são os módulos de elasticidade da argamassa e do agregado, respectivamente.

c_m e c_a , são as contribuições volumétricas da argamassa e do agregado, respectivamente ($c_a = V_a/V_c$).

Em seu estudo Nilsen e Monteiro (1993), avaliaram a aplicação dos limites do modelo de Hashin e Shtrikman (H-S) no cálculo do módulo de elasticidade do concreto. Os autores concluíram que, quando as medidas experimentais dos módulos de elasticidades estão abaixo do limite inferior dado pelo modelo de H-S, o concreto não pode ser considerado como um compósito bifásico. Nesse caso, uma terceira fase deve ser incluída, a Zona de Transição (ZT). No caso em que o resultado está dentro dos limites do modelo de H-S o concreto é considerado um compósito bifásico, como esperado. O modelo de H-S pode ser utilizado com boa precisão para estimar módulo de elasticidade de concreto de alta resistência e relação a/c próxima de 0.3, de acordo com o trabalho de (TOPÇU; BILIR; BOĞA, 2010).

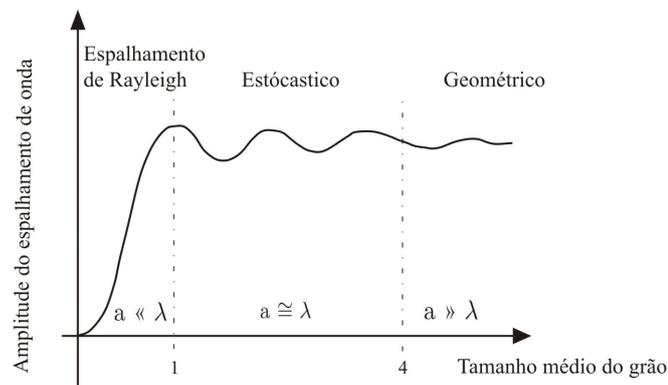
2.8 Características físicas da atenuação

Quando a onda mecânica se propaga por um meio heterogêneo, a amplitude tende a diminuir com a distância percorrida. Isto se deve à perda de energia por meio da absorção e do espalhamento da onda. A combinação destes dois fatores é denominada atenuação da onda.

A absorção pode ser entendida como a resistência ou amortecimento que o meio exerce sobre as partículas vibrantes, fazendo com que as partículas voltem às suas posições de equilíbrio. Nesse processo, a energia do movimento é convertida em calor (KRAUTKRÄMER; KRAUTKRÄMER, 1990).

O espalhamento ocorre quando a onda incide nas discontinuidades presentes na superfície ou no interior do material. A refração, reflexão e a difração da onda varia de acordo com o ângulo de incidência, mudança da densidade e das propriedades mecânicas dos componentes existentes no meio. Em materiais heterogêneos, essas mudanças estão relacionadas aos vazios, inclusões, tamanho dos grãos, fases dos seus constituintes, bem como as fissuras distribuídas (POPOVICS, 2003; AGGELIS; SHIOTANI, 2007). Como resultado, parte da energia total é desviada e transferida em diversas direções (SHULL, 2002). Na figura 2.9, é apresentada três regiões de espalhamento de onda em função do tamanho da partícula (a) e do comprimento de onda (λ), sendo: espalhamento de Rayleigh, estocástico, geométrico.

Figura 2.9 – Regime de espalhamento da onda em função do tamanho do grão.



Fonte: Adaptado de Shull (2002).

- Espalhamento de Rayleigh ($a \ll \lambda$)

Nesse regime, o tamanho do grão é muito menor que o comprimento de onda e o espalhamento ocorre em todas as direções. As inspeções ultrassônicas são geralmente utilizadas nessa região para determinar o tamanho das partículas.

- Espalhamento estocástico ($a \cong \lambda$)

Esta é a região intermediária entre o espalhamento de Rayleigh e o geométrico. O tamanho da partícula é da ordem de grandeza que o comprimento de onda. Esse regime é marcado por uma magnitude oscilante das ondas espalhadas (ressonância). É possível notar que o espalhamento máximo ocorre quando $a = \lambda$.

- Espalhamento geométrico ($a \gg \lambda$)

No regime geométrico o tamanho da partícula é muito maior que o comprimento de onda. O espalhamento e a direção das ondas desviadas são governados pela condição geométrica das partículas.

A atenuação por absorção e espalhamento do pulso ultrassônico pode ser escrita matematicamente através do decaimento exponencial da energia, dada pela Equação 2.14 (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002; SHULL, 2002). A partir da Eq. 2.14 o coeficiente de atenuação em dB/m - decibel por metro ², pode ser expresso de acordo com a Equação 2.15.

$$A_1 = A_0 e^{-\alpha \Delta x} \quad (2.14)$$

$$\alpha = \frac{20}{x_1 - x_0} \log \left(\frac{A_0}{A_1} \right) \quad (2.15)$$

Onde:

A_1 = Amplitude medida a uma distância x_1 ;

A_0 = amplitude medida inicialmente;

α = coeficiente de atenuação;

Δx = distância entre os dois pontos de medição.

De acordo com Krautkrämer e Krautkrämer (1990), a atenuação da onda por absorção e espalhamento impõe limites práticos nos testes de ultrassom. A absorção pura, enfraquece a energia transmitida, assim como os ecos de possíveis falhas do material. Para neutralizar este efeito, a tensão do transmissor e a amplificação do receptor podem ser aumentadas. Também é possível diminuir a frequência do transdutor emissor resultando numa baixa absorção pelo meio. No método do pulso-eco o espalhamento, não só reduz a altura do eco como produz numerosos ecos com diferentes tempos de propagação, fazendo com que os ecos verdadeiros se percam. Nesse caso, o efeito não é neutralizado com o aumento da tensão do transmissor nem com a amplificação do receptor, pois a dispersão tende a aumentar simultaneamente. A única saída é

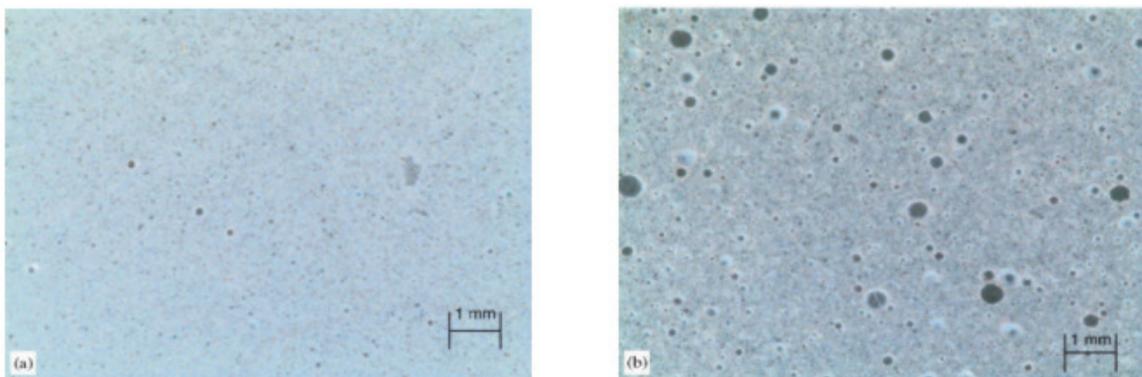
² A unidade de Np/m (Nepers por metro) também é utilizada como medida do coeficiente atenuação. A conversão entre as duas medidas é dada por: α (dB/m) = 8,686 α (Np/m).

utilizar frequência mais baixa, resultando no aumento do comprimento da onda, que por sua vez impõe um limite natural e insuperável na detecção de pequenas falhas. Apesar dessas limitações, a atenuação da onda pode ser um bom parâmetro na análise do concreto, no entanto a descrição da metodologia dessa análise não é informada nas normas (KOMLOS *et al.*, 1996).

2.9 Potencialidade do ensaio de pulso ultrassônico na avaliação do concreto

Punurai *et al.* (2006) utilizaram valores de atenuação da onda para caracterizar o tamanho e a proporção de vazios na pasta de cimento endurecida, com e sem incorporador de ar, figura 2.10. Os autores propuseram um modelo teórico, baseado no desenvolvimento de um algoritmo, para representar a pasta de cimento endurecida. Nesse modelo, a pasta de cimento foi considerada como um sistema bifásico simples, constituído por uma fase sólida (pasta de cimento endurecida) e um conjunto de ar, distribuído aleatoriamente e sem nenhuma interação. A atenuação da onda no modelo se deve à perda por absorção da matriz viscoelástica e pelo espalhamento devido ao tamanho do vazio.

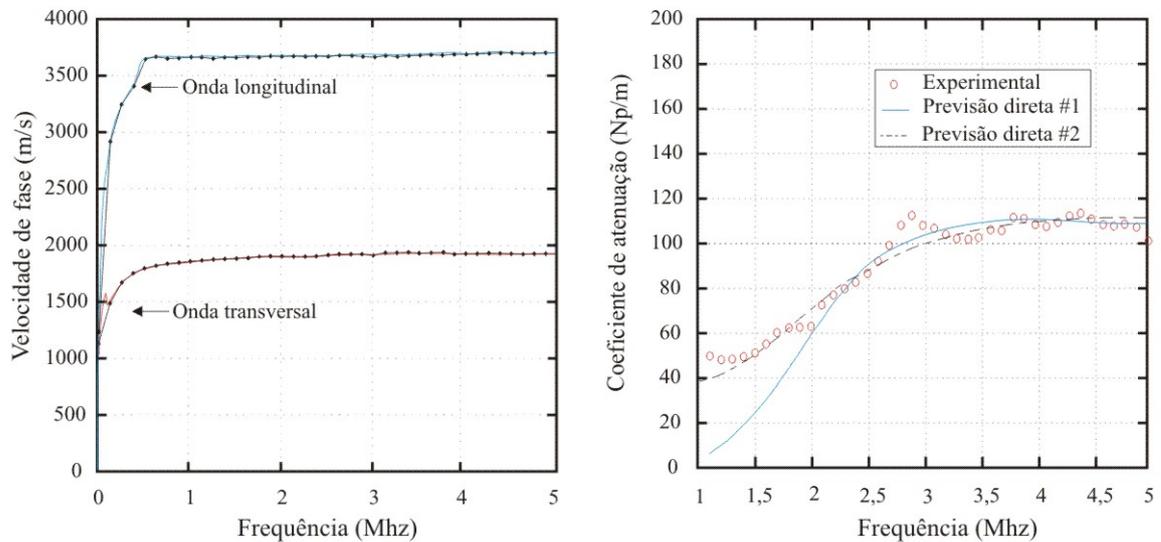
Figura 2.10 – Argamassa (a) sem incorporador de ar (b) com incorporador.



Fonte: Punurai *et al.* (2006).

Com o modelo teórico capaz de indicar a contribuição do mecanismo de absorção e espalhamento nos valores de atenuação da onda, foram realizados os ensaios experimentais em corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e relação a/c de 0,4. A cada mistura, o incorporador de ar foi adicionado na proporção de 0,2 % em relação à massa de cimento. O objetivo do trabalho foi realizar o processo reverso, ou seja, medir os valores de atenuação por meio de experimentos e estimar a fração e o tamanho dos vazios através do modelo teórico desenvolvido. Os resultados para a velocidade do pulso ultrassônico e para a atenuação são apresentados na figura 2.11.

Figura 2.11 – Velocidade de fase (a) e o coeficiente de atenuação do pulso (b).

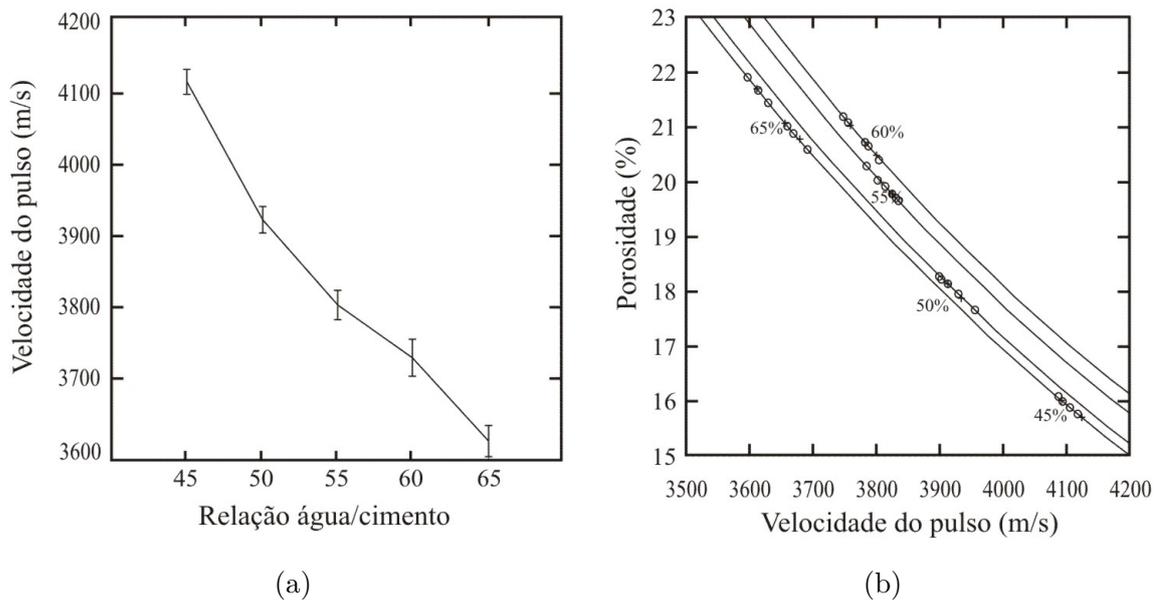


Fonte: Adaptado de Punurai *et al.* (2006).

Na fig. 2.11 (a), pode-se observar que o valor de velocidade para frequência menor que 500 kHz cai repentinamente. Segundo os autores, esse fenômeno ocorre como artefato de resposta à frequência do sistema de medida; não há energia suficiente nessa faixa de frequência, de modo que a análise da razão espectral pode produzir resultados inconsistentes. Na fig. 2.11 (b), os resultados de atenuação dos ensaios experimentais foram gerados. Com base nesses resultados, foi utilizado o processo reverso com o uso do algoritmo, em que foram geradas duas novas curvas. No primeiro caso (Previsão direta #1), foi considerado que os vazios tinham o mesmo tamanho. Percebe-se que há uma boa concordância para frequência acima de 2,25 MHz. Devido a esse resultado, uma nova distribuição foi analisada (Previsão direta #2), com vazios com dois tamanhos distintos. Nesse caso, ocorreu uma melhor concordância com os resultados experimentais.

Em seu trabalho Vergara *et al.* (2001) avaliou a porosidade da argamassa através de três métodos analíticos, sendo: ruído estrutural do material, velocidade do pulso ultrassônico e a atenuação da onda. Para a etapa experimental, foram confeccionados 120 corpos de provas prismáticos (4 x 4 x 16 cm). Cinco relações água/cimento foram consideradas: 0,45, 0,50, 0,55, 0,60 e 0,65, resultando em 24 amostras para cada relação a/c. No ensaio de pulso ultrassônico, foi utilizado o transdutor com frequência de 1 MHz, o valor médio da velocidade e o desvio padrão para cada grupo são apresentados na figura 2.12 (a).

Figura 2.12 – Velocidade do pulso na argamassa (a) e no modelo micro-mecânico (b).



Fonte: Adaptado de Vergara *et al.* (2001).

Simultaneamente ao ensaio de pulso ultrassônico, um modelo numérico micro-mecânico foi aplicado à argamassa. Nesta etapa, a argamassa foi considerada um material bifásico, constituído por uma fase sólida com vazios cilíndricos alongados distribuídos aleatoriamente. Com base nessa suposição, curvas correlacionando a velocidade de propagação com a porosidade foram obtidas (fig. 2.12(b)). Os autores concluíram que, comparando os três métodos propostos, a análise de velocidade do pulso ultrassônico pode estimar a porosidade da argamassa de maneira satisfatória. O ruído estrutural e a atenuação da onda mostraram uma boa tendência de correlação, mas uma baixa precisão para ser considerada uma técnica confiável.

Philippidis e Aggelis (2005) realizaram ensaios experimentais para avaliar a dispersão da velocidade e a atenuação das ondas mecânicas em materiais cimentícios. Foram moldadas amostras de concreto, argamassa e pasta de cimento alterando a relação água/cimento e o teor de agregados miúdos e graúdos. Os autores concluíram que, a partir dos resultados de velocidade obtidos, as alterações da relação água/cimento na pasta de cimento e na argamassa foram mais evidentes. Já a atenuação da onda pode ser usada de maneira satisfatória na análise da argamassa e do concreto. Por fim, os autores recomendaram o uso de transdutores com frequência superior a 100 kHz para a análise do concreto com diferentes relações de a/c e agregados/argamassa, pois, neste cenário, os valores da atenuação apresentam tendências mais claras para diferentes traços do concreto.

De acordo com Malhotra e Carino (2004), a velocidade do pulso ultrassônico no concreto é afetada pelo tipo e quantidade de agregados graúdos presentes em sua composição. Geralmente, a velocidade na pasta de cimento é menor que a velocidade no agregado. Portanto, concreto com maior quantidade de agregados tende a ter velocidade de pulso maior. O agregado graúdo terá a mesma velocidade das ondas mecânicas que a rocha matriz. A velocidade do pulso nas

rochas depende das suas propriedades elásticas e densidade, que é função da sua composição mineralógica (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002; SCHÖN, 2011). A tabela 2.3, mostra as principais características de rochas comuns, assim como as velocidades das ondas longitudinais e transversais.

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas dos tipos comuns de rochas.

Grupo das rochas	ρ (g/cm ³)	ν	E (Gpa)	V_p (m/s)	V_s (m/s)
Basalto	2,6 - 3,0	0,16 - 0,38	34 - 100	4500 - 6200	2350 - 3350
Granito	2,6 - 3,0	0,10 - 0,39	26 - 75	4200 - 5800	2600 - 3300
Arenito	2,6 - 2,9	0,06 - 0,46	2 - 39	2690 - 5600	1180 - 2690
Calcário	2,5 - 2,8	0,12 - 0,33	7 - 91	3680 - 6320	1990 - 3690
Quartzito	2,6 - 2,7	0,07 - 0,24	42 - 100	3300 - 6420	1750 - 3300

Fontes : Neville (2016) e Schön (2011).

Abo-Qudais (2005), avaliou a heterogeneidade do concreto através da velocidade do pulso ultrassônico, tendo como variáveis o diâmetro máximo do agregado graúdo, relação a/c e o tempo de cura. O autor concluiu que, para baixa relação a/c, a dimensão máxima do agregado graúdo não afeta de maneira significativa a velocidade do pulso ultrassônico. Já para relação a/c elevada, a quantidade de vazios capilares e de microfissuras na zona de transição aumentam, causando a redução na sua capacidade de transmitir ondas mecânicas. Nesse caso, o concreto com agregados graúdos de maiores dimensões apresentaram as menores velocidades de pulso. A velocidade da onda aumenta com o tempo de cura pois, o volume de poros capilares tende a diminuir com o progresso do grau de hidratação visto que a relação gel/espaco tende a aumentar com a idade do concreto (ABO-QUDAIS, 2005; IKPONG, 1993).

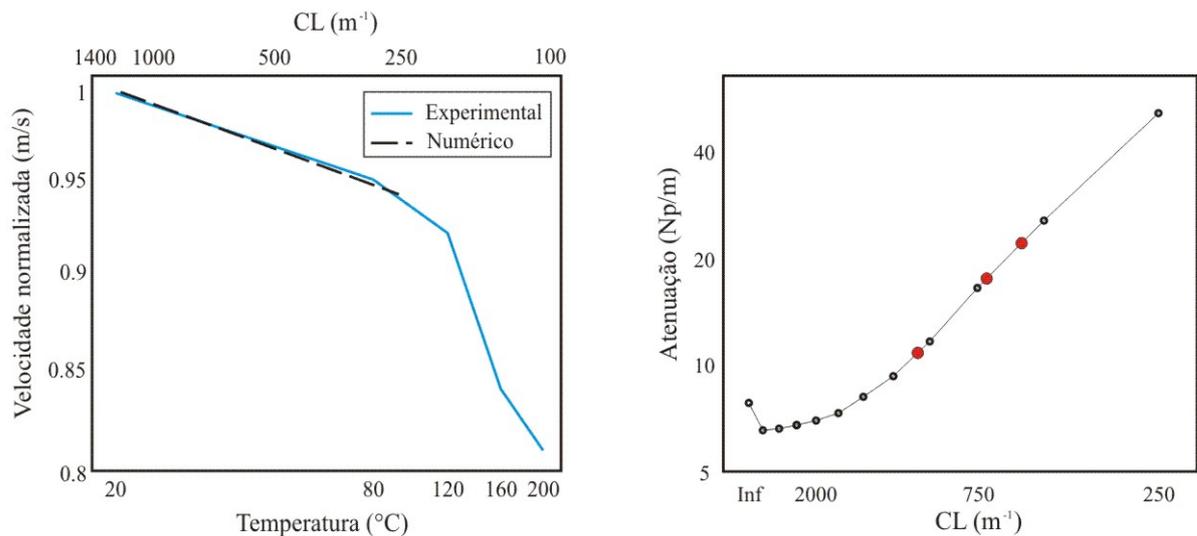
Em seu trabalho Ramaniraka *et al.* (2019) investigaram por meio de simulações numéricas e ensaios experimentais a influência da Zona de Transição Interfacial (ZTI) nas medidas de velocidade e atenuação da onda. Na modelagem numérica, o módulo de elasticidade da ZTI foi de 10% do valor da argamassa, mantendo-se o mesmo valor do coeficiente de poisson. Devido à dificuldade em modelar uma fina camada envolta de todos os agregados, foi adotado o sistema de massa-mola para representar a pedra de energia nas simulações numéricas. Nesse sentido, a rigidez da mola está em função da densidade da argamassa, da velocidade da onda de compressão e do ‘nível de contato - (CL)’ entre a argamassa e os agregados. Esse último parâmetro é definido de acordo com a fórmula 2.16.

$$CL = \frac{E_{ZTI}/E_{arga}}{h} \quad (2.16)$$

Os valores da velocidade da onda obtidos nos ensaios experimentais tiveram como variável a temperatura. Como pode ser visto na figura 2.13 (a), as velocidades da onda diminuem com o aumento dos danos térmicos, que por sua vez altera ZTI, causando um menor nível de contato entre a argamassa e os agregados. Na figura 2.13(b), é mostrada a evolução da atenuação da onda para diferentes espessuras da ZTI, o valor inicial de 8 Np/m corresponde ao contato perfeito

entre a argamassa e os agregados, a medida que o nível de contato diminui há um aumento nos valores de atenuação. Os pontos destacados em vermelho são medidas experimentais de atenuação encontradas na literatura, pelos autores.

Figura 2.13 – Velocidade das ondas em função da temperatura (a) e a atenuação da onda (b).



(a)

(b)

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

Os autores concluíram que apenas a constante de impedância – contato perfeito entre a argamassa e os agregados - não foi suficiente para explicar as lacunas existentes entre a velocidade obtidas nas simulações numéricas e experimentais. Nesse sentido, ao considerar a zona de transição ocorreu uma influência significativa nas velocidades e na atenuação da onda. No entanto, ainda é necessário vincular diferentes níveis danos devido à temperatura com o parâmetro CL.

Em seu trabalho Haach *et al.* (2021) estudaram a possibilidade de avaliação da anisotropia do concreto através das medidas de velocidades do pulso ultrassônico em corpos de prova concretados na vertical e na horizontal. Para que isso fosse possível foi utilizado um algoritmo de otimização, algoritmo genético, para calibrar o modelo numérico com o experimental. Os dados usados no modelo numérico foram obtidos por meio dos ensaios de ultrassom e o sonelastic. Como resultado, os autores concluíram que, as diferentes direções de concretagem, vertical e horizontal, influenciaram significativamente nas medidas das velocidades do pulso ultrassônico indicando que o concreto possui um comportamento mecânico isotópico transversalmente quando concretado na vertical e ortotrópico para a concretagem realizada na horizontal.

A anisotropia do concreto também foi avaliada por Bertoldo, Gorski e Gonçalves (2020) na qual foi utilizado um corpo de prova poliedro com 26 faces, tendo como propósito reconstruir a matriz constitutiva do material analisado, o concreto. As medidas das constantes elásticas foram obtidas por meio das velocidades do pulso ultrassônico e, a partir dos resultados alcançados,

foram realizados testes estatísticos com a finalidade de avaliar a diferença entre as medidas das constantes elásticas nas direções avaliadas. As autoras concluíram que o concreto apresenta um comportamento isotrópico visto que não há diferença significativa das constantes nos três eixos de simetria estudados.

Na sua pesquisa Turgut e Kucuk (2006) buscaram correlacionar as medidas de velocidades dos pulsos ultrassônicos realizadas na configuração diretas com as medidas semi-indireta e indiretas na vertical e na horizontal, tendo como direção de referência o sentido da concretagem do concreto, que foi a vertical. Os autores destacam que a concretagem realizada na vertical produz uma camada de exsudação no plano horizontal que afeta a velocidade do pulso ultrassônico nas medidas indiretas verticais. A diferença resultante nas velocidades das medidas diretas são maiores que as medidas indiretas verticais, horizontais e semi-diretas, em aproximadamente 9%, 4% e 4% respectivamente. O valor da velocidade na medida indireta horizontal é 5% maior que no sentido indireto na vertical. Os autores apontaram que a direção de concretagem é um fator relevante e que afeta as medidas de velocidades dos pulsos ultrassônicos realizadas em outras direções.

As medidas de velocidades feitas num determinado plano da seção transversal do concreto podem ser usadas na reconstrução bidimensional dessa seção em termos de distribuição das velocidades, formando os mapas de velocidades. Nessa técnica, os valores das velocidades podem ser correlacionados com zonas homogêneas e/ou danificadas presentes no interior do concreto (MCCANN; FORDE, 2001). Essa observação só é possível por meio de técnicas de reconstrução iterativas na qual a sua solução é baseada na resolução de sistemas algébricos, dado pela expressão 2.17. O sistema de equações são obtidas a partir da soma das distâncias de cada elemento da malha de discretização do corpo de prova. A malha de discretização varia de acordo com o nível de precisão que se deseja obter ou conhecendo-se o tamanho da não-homogeneidade que se espera identificar. As trajetórias dos pulsos ultrassônicos, nessa análise, são assumidas como retilíneas e as medidas do tempo de propagação são determinadas por meio do ensaio experimental. Na expressão 2.17, o termo P_i denominado vagarosidade que pode ser entendido como o inverso da velocidade.

$$T_j = D_{i,j}P_j \quad (2.17)$$

Onde:

i = Números de elementos discretizado;

j = Número total de leituras realizadas;

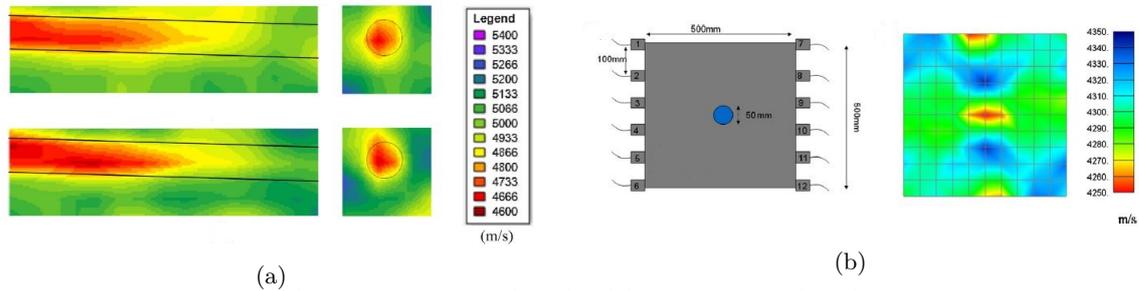
T = Vetor com i linhas que armazena as leituras de todos os tempos j ;

D = Matriz de dimensão i linhas e j colunas, com os valores das distâncias em cada leitura j ;

P = Vetor da vagarosidade com j linhas que possui os valores dos elementos discretizados j .

A partir da resolução do sistema de Equação, é possível avaliar a seção do material a partir das variações das velocidades da seção analisada. O resultado desse procedimento é um mapa de velocidades chamado de tomograma. Na figura 2.14 a seguir são apresentadas algumas aplicações desta técnica.

Figura 2.14 – Tomografia ultrassônica (a) tomograma de um modelo experimental e (b) numérico.



Fonte: (a) Haach e Ramirez (2016) e (b) Aggelis *et al.* (2011).

Os resultados apresentados na figura 2.14 foram obtidos através de metodologias distintas. No caso da figura 2.14 (a), foram feitos ensaios experimentais com a anomalia interna ao concreto conhecida. Sendo representada nesse caso, por um EPS com dimensões e posição conhecidas. Já na segunda aplicação, figura 2.14 (b), o tomograma foi obtido por meio de simulações numéricas, na qual as propriedades de cada elemento que compõe o modelo foram definidas e, posteriormente, feitas as medidas de velocidades dos pulsos resultando no tomograma apresentado, figura (2.14 (b)). Em ambos os casos, a técnica de tomografia tem grande potencial na análise das estruturas de concreto, permitindo que sejam identificados não-homogeneidade no elemento analisado.

As medidas de velocidades também podem ser utilizadas para estimar o nível de tensão em elementos de concreto. Para que isso seja possível são necessárias as equações de acustoelasticidade desenvolvidas Hughes e Kelly (1953) para meios elásticos isotrópicos, na qual foram utilizadas coordenadas langrangianas e a teoria de Murnaghan (1937) para deformações finitas. Em seu estudo Popovics e Popovics (1991) mediram experimentalmente a velocidade do pulso ultrassônico no concreto durante a aplicação de tensão e concluíram que a velocidade do pulso ultrassônico feita na direção perpendicular a aplicação do carregamento não varia para uma larga faixa de tensão. Segundo os autores, as microfissuras desenvolvidas no concreto durante o carregamento não são suficientes para afetar a velocidade do pulso ultrassônico. Ocorre a queda nas medidas de velocidades quando o nível de tensão aplicada aumentam as fissuras influenciando no módulo de elasticidade que tende a diminuir a velocidade do pulso.

Por outro lado, Bompan e Haach (2018) avaliaram a variação da velocidade do pulso ultrassônico através da acustoelasticidade e verificaram que as ondas que se propagam e estão polarizadas na direção da aplicação da carga de compressão sofrem maiores variações a cada ciclo de carregamento. Corroborando com o estudo de Lillamand *et al.* (2010) que verificaram uma variação na velocidade do pulso ultrassônico de 92 m/s pode ser atribuída ao aumento de tensão no concreto de 16 MPa, para as ondas longitudinais.

Nesse capítulo foi apresentado a relevância dos ensaios não destrutivos e como esses métodos são utilizados para avaliar as estruturas de concreto. Foram discutidos os principais fatores que afetam a velocidade do pulso ultrassônico, sendo apontado os cuidados que devem ter durante a realização do ensaio quanto às principais propriedades da composição do concreto. Em seguida, foram abordados os princípios físicos da atenuação da onda, e como esse parâmetro

aliado às medidas de velocidades do pulso podem ser usado no estudo da heterogeneidade concreto. Por fim, foi apresentada a técnica de tomografia ultrassônica, assim como a teoria da acustelastividade. Esses dois métodos são considerados promissores podendo ser utilizados na avaliação da homogeneidade do concreto e na análise do estado de tensão em elementos estruturais. Em todas as aplicações e metodologias discutidas anteriormente o mesmo objeto de estudo foi analisado, nesse caso, o concreto. No entanto, poucos trabalhos abordaram um estudo aprofundado de como a composição do concreto influencia nas medidas de velocidades do pulso. Nesse sentido, nos próximos itens serão apresentadas a metodologia adotada, assim como, os resultados alcançados e as discussões desenvolvidas.

3 METODOLOGIA

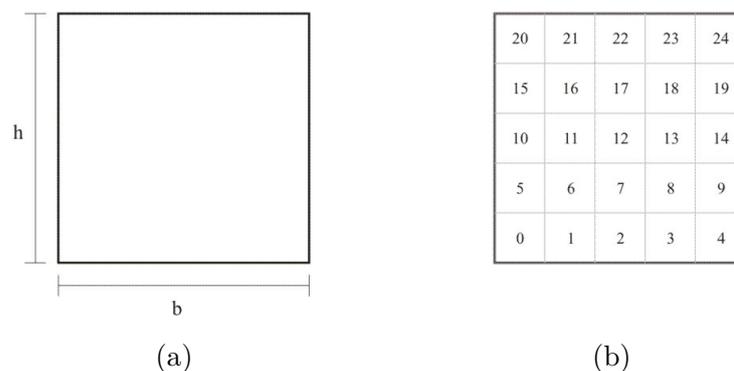
Neste capítulo, serão apresentados brevemente o funcionamento do *Software* TUSom e as etapas necessárias para definir o modelo numérico a ser analisado. Em seguida, é descrita a implementação realizada no TUSom para distribuir os agregados no contínuo de maneira automatizada. Nessa etapa, foi desenvolvida uma nova interface para o programa. No final do capítulo, são apresentados os modelos numéricos, que foram estudados investigando as principais características do agregado graúdo e a sua influência nas medidas de velocidades e no seu coeficiente de variação (CV). Nesse sentido, foi avaliado o comportamento dos resultados numéricos e, em seguida, foi sugerida uma equação que se aproximou dos resultados obtidos. Utilizando o *software* OriginLab, foi feito o ajuste da função proposta (*fitting*) tendo como parâmetro de análise o coeficiente de determinação r^2 .

3.1 Software TUSom

O *software* TUSom foi desenvolvido pelo Prof. Dr. Vladimir Guilherme Haach, do Departamento de Engenharia de Estruturas da USP. O código foi escrito em linguagem Pascal, no ambiente de programação Lazarus. A versão atual do TUSom permite determinar o tempo de propagação da onda mecânica dada uma seção transversal com dimensões conhecidas e, por meio de um algoritmo pre-existente, é possível lançar as partículas com tamanho, forma e geometria definida pelo usuário. Para que um modelo numérico seja criado no TUSom é necessário seguir algumas etapas iniciais que serão apresentadas brevemente.

A primeira etapa para utilizar o TUSom consiste em definir a geometria do objeto que será analisado. Na análise bidimensional, o elemento é definido através das coordenadas dos vértices. A malha também é criada nessa etapa, sendo utilizada para discretizar o elemento previamente definido. O tamanho da malha é usada como referência para o posicionamento dos transdutores na simulação numérica. Na figura 3.1 é apresentado um modelo esquemático dessa primeira etapa.

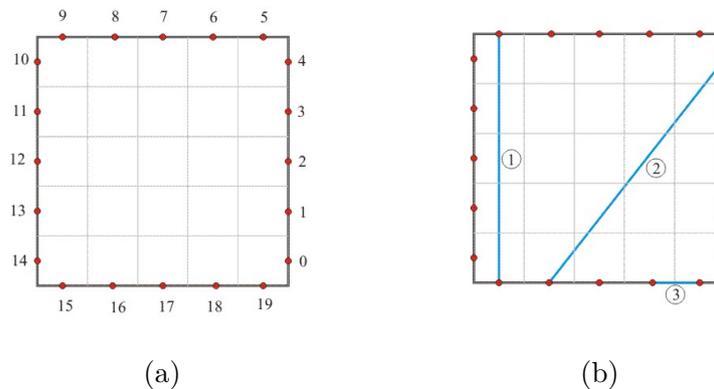
Figura 3.1 – Entrada geométrica (a) e definição das malhas (b).



Fonte: Autor.

Com a geometria e as malhas definidas, prossegue com a entrada das coordenadas dos pontos de medição e definem as linhas de medições, ou seja, são determinados os pontos que estão conectados. Assim, é possível indicar em que pontos estão o transdutor emissor e o receptor. No caso de uma análise experimental, o programa é capaz de receber os dados das leituras dos tempos obtidos nos ensaios experimentais, tanto na configuração direta, indireta quanto na semidireta. As trajetórias do pulso podem ser retilíneas, conectando os pontos de medição (Fig.3.2).

Figura 3.2 – Pontos de medição (a) e trajetórias retilíneas(b): (1) direta, (2) semidireta e (3) indireta.



Fonte: Autor.

O passo seguinte consiste em criar e lançar a partícula no contínuo. O TUSom possui um algoritmo que permite gerar a partícula com o formato de um polígono regular, onde o fator de forma, diâmetro e o número de lados podem ser alterados. Esse processo exige que alguns critérios sejam impostos. O mais simples é criar a partícula apenas se o seu centro e todo o contorno estiverem dentro dos limites da seção geométrica definida. O outro critério que deve ser atendido é que duas ou mais partículas não podem ocupar o mesmo espaço, ou seja, não podem se sobrepor e, todas devem estar no interior do elemento definido na etapa anterior. Por fim, há a possibilidade de estabelecer a quantidade máxima de tentativas para o lançamento das partículas no contínuo. Caso o número de tentativa exceda o valor estabelecido o programa irá informar a quantidade de partículas geradas. Desta forma, é necessário repetir o processo até atingir a quantidade de partículas desejável. Esse é um recurso útil para impor um tempo de processamento nesta etapa.

Determinada as propriedades geométricas da seção transversal ou/e longitudinal, define-se as velocidades de propagação do pulso nas partículas e no contínuo, V_{part} e V_{cont} , respectivamente. Assim, é criado o mapa de velocidades na seção a ser analisada. Supondo-se que, a distância percorrida pelo pulso nas simulações numéricas são as retas que unem dois pontos de medições, o tempo de propagação total pode ser entendido com a parcela do tempo necessário para o pulso percorrer o contínuo (ΔS_{cont}) mais a contribuição do tempo necessário para atravessar as partículas interceptadas pelas linhas de medições (ΔS_{part}). Na Equação 3.1, é representada de forma matemática o cálculo do tempo de propagação do pulso no contínuo.

$$t_{tot} = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{\Delta S_{con,i}}{V_{con}} + \sum_{i=0}^{i=n} \frac{\Delta S_{part,i}}{V_{part}} \quad (3.1)$$

Onde:

$$\begin{aligned} t_{tot} &= \text{tempo total;} \\ \frac{\Delta S_{con,i}}{V_{con}} &= \text{parcela do tempo no contínuo;} \\ \frac{\Delta S_{part,i}}{V_{part}} &= \text{parcela do tempo nas partículas.} \end{aligned}$$

3.2 Implementações realizadas no TUSom

No concreto, os agregados graúdos e miúdos estão distribuídos aleatoriamente na pasta de cimento. Devido a essa característica, as simulações numéricas realizadas neste trabalho visam representar de forma aproximada esse aspecto. Para isso é preciso calcular a fração volumétrica dos agregados graúdos sendo necessárias algumas informações do concreto obtidas do programa experimental como, por exemplo: o traço em massa do concreto e as massas específicas de cada componente. Como as simulações numéricas foram realizadas no espaço bidimensional, a terceira dimensão foi considerada constante, isto implica que, o valor calculado para a fração volumétrica dos agregados graúdos foi usada como a fração de área tomada pelas partículas. Nesse sentido, serão descritas de maneira mais detalhada as etapas implementadas no *software* para automatizar a geração de partículas.

- A partir da entrada geométrica, que define a seção transversal do elemento, determina-se a área do objeto analisado (A_{total}). Em seguida, é necessário informar o traço em massa do concreto e as massas específicas dos constituintes. Esses valores são utilizados no cálculo da fração volumétrica ($frac$) dos agregados graúdos, que por sua vez é utilizado como área superficial ($A_{agr.tot}$);

$$A_{agr.tot} = frac \cdot A_{total} \quad (3.2)$$

- A curva granulométrica dos agregados graúdos é definida inserindo-se os valores das massas retidas em cada peneira. Essa etapa é muito importante, pois a quantidade de partículas que serão geradas é baseada na porcentagem da massa retida na peneira. Nesse sentido, o uso ou não de uma determinada peneira no ensaio de granulometria altera a massa retida na peneira subsequente e, conseqüentemente, esta mudança influencia na quantidade de agregados gerados na simulação;

$$A_{agr(i)} = massa\ retida\ (\%)_{(i)} \cdot A_{agr.tot} \quad (3.3)$$

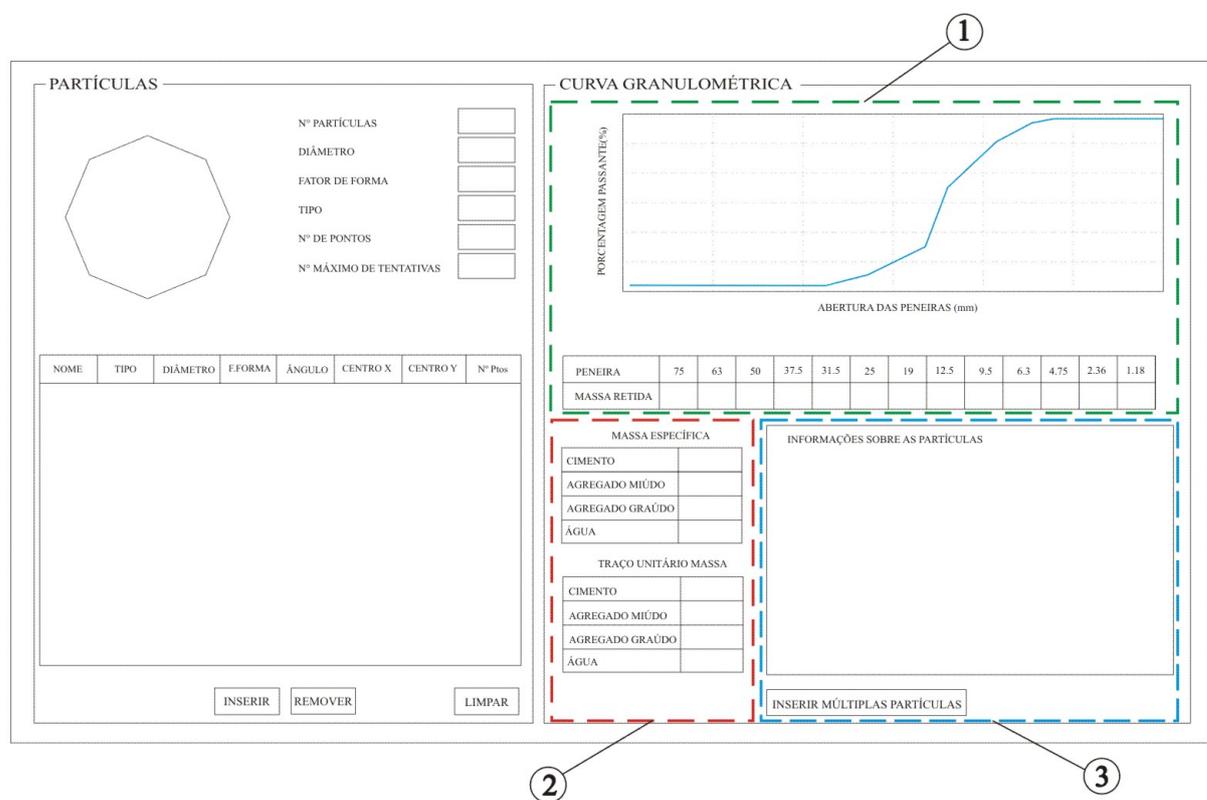
Onde:

$$\begin{aligned} A_{agr(i)} &= \text{Área da superfície dos agregados (i);} \\ massa\ retida\ (\%)_{(i)} &= \text{valor da massa retida na peneira (i);} \\ A_{agr.tot} &= \text{área total da superfície tomada por agregados;} \\ i &= \text{número da peneiras.} \end{aligned}$$

- As partículas que são geradas no TUSom possuem o mesmo diâmetro dentro da mesma faixa de peneiras. Dessa forma, os tamanhos das partículas mudam à medida que percorre a sequência das peneiras. A quantidade de partículas está em função da relação entre a área retida na peneira ($A_{agr(i)}$) e a área da menor partícula possível, ou seja, o diâmetro da partícula é igual a menor abertura da série de peneiras analisadas. No caso em que a área restante da divisão não seja suficiente para criar a menor partícula da série de peneiras em questão, essa será somada a área retida subsequente.

A finalização da etapa de implementação conta ainda com a modificação na interface do programa TUSom, tornando o processo de geração de partículas mais informativo. Na figura 3.3 é apresentada a interface do software após as alterações.

Figura 3.3 – Interface atual.



Fonte: Autor.

Como pode ser observado na figura 3.3, a partir dos valores das massas retidas em cada peneira é possível visualizar o traçado da curva granulométrica dos agregados graúdos, região destacada com o número 1. O local onde estão as informações sobre o traço do concreto em massa e as massas específicas é indicado com número 2. Também é apresentada as principais informações sobre os agregados, tais como: o diâmetro máximo, o valor da área que será tomada pelos agregados, a fração volumétrica dos agregados graúdos assim como, a quantidade de cada partícula e seu respectivo diâmetro, no local destacado com o número 3. A abertura da série de peneiras, normal e intermediária, e o cálculo do diâmetro máximo dos agregados graúdos seguiram as recomendações da ABNT NBR 7211 (2022).

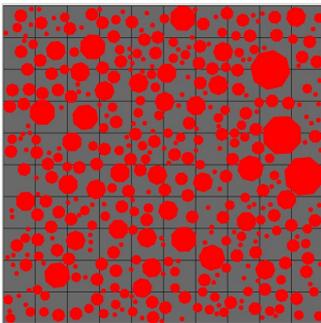
Como exemplo, na tabela 3.1, são apresentados o traço de concreto e as massas específicas utilizadas para gerar os agregados graúdos por meio da implementação realizada. Foi usada uma curva granulométrica genérica com dimensão máxima dos agregados graúdos de 25, 19 e 12,5 mm. As partículas são representadas por polígonos regulares com 8 lados e índice de forma igual a 1. A partir dessa etapa, foi possível verificar que o algoritmo é capaz de criar curva granulométricas uniformes, bem e mal graduadas.

Tabela 3.1 – Traço em massa do concreto e as massas específicas.

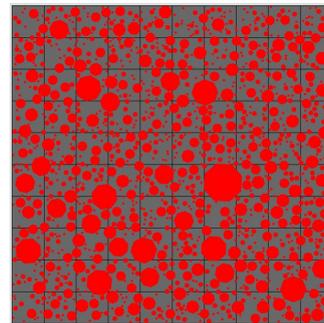
	cimento	agregado miudo	agregado graúdo
Traço	1,0	1,3	2,2
Massa espc.	3,14	2,68	2,75

Nas Figuras 3.4 (a), (b) e (c), são exibidas a distribuição das partículas no contínuo seguindo as informações da tabela 3.1 com diferentes curvas granulométricas com as dimensões máximas de 25, 19 e 12,5 mm, respectivamente.

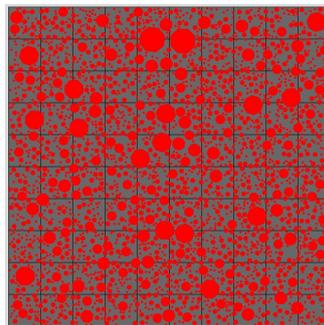
Figura 3.4 – Simulação da implementação.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

Pode-se observar nas Figuras 3.4 (a), (b) e (c), que embora a área ocupada pelos agregados graúdos seja a mesma em todas as simulações, a curva granulométrica tem um impacto significativo no tamanho e na quantidade de partículas geradas. Como a fração de agregados graúdos no concreto comum está na faixa de 30% a 40% do volume total (MA; XU; LI, 2016),

pode-se dizer que para essa faixa de fração o código implementado atendeu bem ao objetivo estabelecido nessa etapa.

3.3 Exemplos simulados

Os exemplos criados para analisar a heterogeneidade do concreto teve como foco investigar as principais características do agregado graúdo e a partir disso estudar a sua influência nas medidas de velocidade e o CV. As variáveis analisadas nessa etapa da pesquisa foram: a razão entre dimensão da partícula e o percurso do pulso, a área ocupada pelas partículas, a diferença entre a velocidade da partícula e do contínuo, fator de forma (FF) das partículas. Por fim, foi realizado um estudo comparativo entre o modelo numérico e experimental. Em todas as análises as partículas foram distribuídas de maneira aleatória no contínuo. Para descrever o comportamento e a influência dessas variáveis nas medidas de velocidades e no CV foi realizado o processo de *fitting* dos resultados numéricos. A seguir são apresentados os exemplos investigados bem como as características e simplificações adotadas nas simulações.

No primeiro exemplo, a seção transversal do contínuo foi representada por meio de um polígono regular de 16 lados com diâmetros de 250, 500 e 750 mm. Nesses modelos, foram investigadas a influência da dimensão máxima da partícula em relação ao percurso total e a área tomada pelas partículas. Como simplificação foi adotada a trajetória retilínea para o pulso. A distribuição das partículas no contínuo ocorreu de maneira aleatória e a cada simulação foram obtidas 8 medidas de velocidade. O elemento triangular foi usado para discretizar o contínuo, sendo necessários oito elementos no total. Os tamanhos das partículas foram obtidos como sendo uma fração da área do contínuo e a sua escolha permitiu obter fração de áreas múltiplas de 5%, percorrendo as proporções de áreas de 5% à 50%. Para as simulações com diâmetro do contínuo de 500 e 750 mm, foram mantidas as mesmas dimensões das partículas determinadas para o contínuo de 250, percorrendo as mesmas proporções de área. O comprimento do percurso do pulso no contínuo de 500 e 750 mm foi de 490,30 e 735,59 mm, respectivamente. A velocidade usada para representar a argamassa foi 3800 m/s com relação a/c de 0.55 (VERGARA *et al.*, 2001), e a velocidade de 5500m/s para as partículas que corresponde ao basalto, (tabela:2.3). Na tabela 3.2, é apresentado os dados do modelo numérico para as simulações com o contínuo de 250 mm.

Tabela 3.2 – Informações das simulações.

Informações do exemplo 1 - $D_{cont} = 250$ mm									
Diâmetro das partículas (mm)	58.16	41.12	29.08	26.01	18.39	11.63	8.22	2.60	
Área da part. / Área do cont. (%)	5.00	2.50	1.25	1.00	0.50	0.20	0.10	0.01	
Quantidade de simulações	5								
Percurso do pulso (mm)	245.19								
Quant. de trajetórias por simulação	8								
Total de trajetórias por simulação	40								
Velocidade do contínuo (m/s)	3800								
Velocidade da partícula (m/s)	5500								

Fonte: Autor.

A razão para manter as partículas de mesma dimensão nos contínuos com diâmetros de 500 e 750 mm teve como proposta investigar a razão D_{part}/D_{cont} e seu impacto nas medidas de velocidades do pulso ultrassônico. Nesse sentido, foi mantida constante a razão D_{part}/D_{cont} em todas as simulações percorrendo a área tomada pelas partículas de 5% a 50% com uma variação de 5%. No modelo experimental, o mecanismo de espalhamento das ondas mecânicas depende do tamanho dos agregados presente no concreto em relação ao comprimento do pulso ultrassônico, fazendo com ocorra múltiplas refrações e reflexões impactando nas medidas de velocidades. No modelo numérico, devido às simplificações adotadas foi possível analisar esse parâmetro de modo isolado. Visto que, no cenário em que as trajetórias são retilíneas e não há o efeito de refração nem reflexão das ondas, a variação das velocidades são influenciadas apenas pelo tamanho e quantidade de partículas no contínuo.

No segundo exemplo, a seção transversal analisada foi a de 250 mm e as características geométricas das partículas foram mantidas constantes. A variável investigada nessa etapa foi a velocidade da partícula, iniciando-se com valores de velocidades menores que a do contínuo e em seguida valores superiores, como pode ser visto na tabela 3.3. Sabe-se que, a velocidade das ondas mecânicas dos agregados graúdos varia de rocha para rocha, já na pasta é influenciada fortemente pela relação a/c. Assim, a partir dos resultados numéricos alcançados, foi investigado o efeito da variável (V_{part}/V_{cont}) nas medidas de velocidades e no CV por meio do *fitting*.

Tabela 3.3 – Informações sobre as velocidades.

Velocidades analisadas									
Velocidade das partículas (m/s)	1000	1700	2400	3100	3800	4500	5200	5900	6600
Velocidade do contínuo (m/s)	3800								

Fonte: Autor.

O terceiro exemplo se conduziu no estudo do fator de forma das partículas (FF). No *software* TUSom a medida em que o fator de forma das partículas aumentam, reduz a área da partícula na mesma proporção. Dessa forma, são necessárias maiores quantidades de partículas

para atender as proporções de áreas estudadas nos exemplos anteriores. Nesse sentido, pode se dizer que o contínuo com partículas de menores dimensões apresenta-se mais homogêneo. Para analisar a influência desse parâmetro, foi implementada essa nova variável (FF) na equação proposta buscando descrever a sua influência nas medidas de velocidades e nos Coeficiente de variação.

No quarto exemplo, foi investigado impacto das trajetórias não-retilíneas nas medidas de velocidades do pulso ultrassônico. Nesse sentido, o estudo se aproximou do comportamento real, visto que as ondas mecânicas tendem a atravessar regiões de maiores homogeneidades que pode ser entendida, no modelo numérico, como regiões onde há maior concentração de partículas. Uma vez que, a velocidade das partículas é superior ao do contínuo. Nessa etapa da análise, foi utilizado o Algoritmo Determinístico de Dijkstra (1959), que tem como objetivo determinar o caminho de custo mínimo partindo do ponto inicial ao final especificados, passando por uma malha de vértices com arestas de peso não negativo. Nos modelos analisados, o tempo necessário para percorrer a distância entre as arestas é sempre positivo assim, essa metodologia se enquadra bem no problema proposto.

O quinto exemplo investigou a influência de partículas com diferentes dimensões nas medidas de velocidades obtidas por meio das simulações numéricas. Para isso, foi adotado o contínuo com diâmetro igual a 250 mm, com 50% da sua área tomada por partículas com dois diâmetros distintos, sendo 25% dessa área para cada diâmetro. Assim, foram adotadas duas formulações para complementar a equação desenvolvida para prever o valor do CV das velocidades. Na primeira proposta, é feita a previsão do CV em função da dimensão das partículas que compõem o modelo numérico analisado. Já na segunda proposta, é feita a previsão do CV das velocidades através da média ponderada dos CVs para cada partícula separadamente.

O último exemplo consiste em comparar a equação desenvolvida nesta pesquisa com resultados experimentais de trabalho científico, verificando se a função permite a aplicabilidade quanto a previsão da velocidade do pulso e sua respectiva variação obtida por meio do CV. A equação desenvolvida para estimar a velocidade do concreto teve como variáveis: a velocidade da argamassa e da rocha e a proporção de agregados que compõem o concreto. Já a equação do CV da velocidade, é descrita em função da razão entre os diâmetros (D_{part}/D_{cont}), da área tomada pelas partículas (A_{part}/A_{cont}), da razão entre as velocidades (V_{part}/V_{cont}) e pelo fator de forma das partículas (FF).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio das simulações numéricas utilizando o *software* TUSom, desenvolvido na Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP. De início, serão discutidos como as principais características dos agregados graúdos influenciam na velocidade do pulso ultrassônico, tendo como critério de análise as médias, os coeficientes de variação das velocidades assim como os erros absolutos e relativos. A proposta das equações para a velocidade e CV também serão apresentadas neste capítulo.

4.1 Análise 1 - Razão entre a dimensão máxima da partícula e percurso do pulso ultrassônico

Em meios heterogêneos, como o concreto, a quantidade e o tamanho das partículas que compõem a mistura influenciam nas propriedades mecânicas desse material, bem como, nas medidas de velocidades dos pulsos ultrassônicos. Isso ocorre devido às múltiplas reflexões, refrações e dispersões que acontecem no interior do material durante a propagação das ondas mecânicas, tornando o comportamento dessas ondas complexo. Devido a esse fato, foram adotadas simplificações nos modelos numéricos buscando reduzir a quantidade de variáveis que existem nessa análise. Novamente é apresentada na tabela 4.1, as principais informações adotadas nas simulações numéricas.

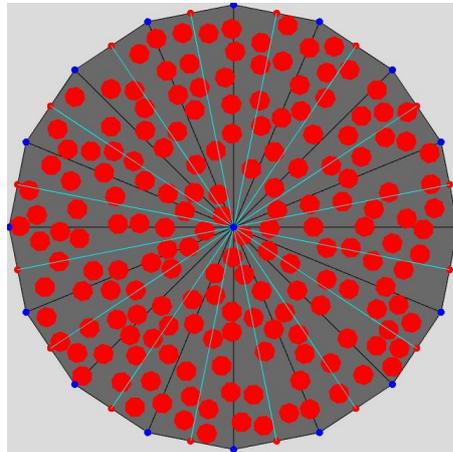
Tabela 4.1 – Informações das simulações.

Informações da análise 1 - Trajetórias retilíneas								
Diâmetro das partículas (mm)	58.16	41.12	29.08	26.01	18.39	11.63	8.22	2.60
Área da part. / Área do cont. (%)	5.00	2.50	1.25	1.00	0.50	0.20	0.10	0.01
Quantidade de simulações	5							
Percurso do pulso (mm)	245.2							
Quant. de trajetórias por simulação	8							
Total de trajetórias por simulação	40							
Velocidade do contínuo (m/s)	3800							
Velocidade da partícula (m/s)	5500							

A forma geométrica utilizada para representar o contínuo foi a de polígono regular com 16 lados, discretizado com elemento de malha triangular. Esses elementos possuem nós que serão utilizados na análise das trajetórias não retilíneas, tópico que é abordado no item 4.4. Já as partículas foram representadas como polígonos regulares com 8 lados e fator de forma 1. As trajetórias dos pulsos são retilíneas de mesmo comprimento, envolvendo toda a superfície do contínuo, essa consideração tem como objetivo eliminar a influência do comprimento do percurso do pulso ultrassônico. Por fim, a interface entre o contínuo e as partículas geradas foi considerada perfeita, ou seja, nenhum tipo de influência da Zona de Transição Interfacial (ZTI) existente

no concreto foi considerada nos estudos. Visando apresentar o modelo numérico utilizado no desenvolvimento da pesquisa foi gerada a figura 4.1, com as partículas de diâmetros de 2.60 mm distribuídas aleatoriamente no contínuo de 250 mm e as respectivas trajetórias retilíneas.

Figura 4.1 – Modelo numérico.



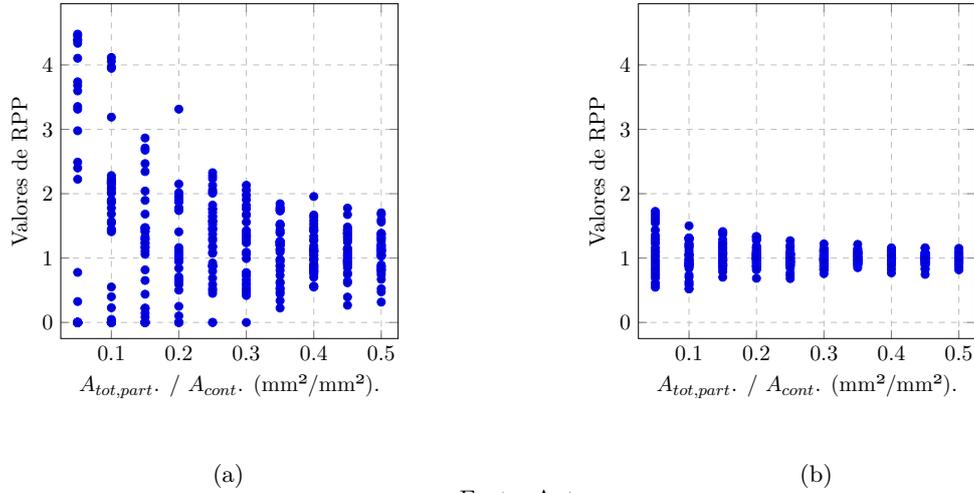
Fonte: Autor.

A fim de verificar como as medidas das velocidades nas simulações numéricas se comportam quando as trajetórias dos pulsos são consideradas retilíneas e as partículas presentes no contínuo possuem o diâmetro, foi criado um parâmetro denominado RPP (Razão de Proporção das Partículas). Esse parâmetro, pode ser entendido como sendo a razão entre distância percorrida pelo pulso nas partículas e o percurso total, dividida pela razão entre a área das partículas e a área do contínuo, como representada pela Equação 4.1.

$$RPP = \frac{\text{Dist. nas partículas} / \text{Dist. do pulso}}{\text{Área das partículas} / \text{Área do contínuo}} \quad (4.1)$$

A partir dos resultados do RPP obtidos para cada diâmetro de partículas e proporção de área, foram gerados os gráficos de dispersão desses resultados para todas as partículas, partindo da maior até a de menor diâmetro, 58.16 e 2.60 mm, respectivamente. Os dados são apresentados nas Figuras 4.2 (a) e (b), e como pode ser observado, à medida que o tamanho das partículas diminuem, os valores de RPP tendem a 1. Nesse cenário, as partículas menores encontram-se distribuídas de maneira mais homogênea no contínuo sendo interceptadas com mais frequência pelas linhas de medições resultando em menores variações nos valores do RPP. Por consequência, pode-se inferir que quando os valores do RPP se aproximam de 1, indica que a distância percorrida pelo pulso nas partículas está se aproximando da área tomada pelas partículas no elemento.

Figura 4.2 – Valores de RPP para as partículas com diâmetro de: (a) 58.16 mm e (b) 2.60 mm.



Fonte: Autor.

Nesse sentido, é possível correlacionar os valores das velocidades com a proporção da área tomada pelas partículas no contínuo. Para demonstrar essa correlação é admitido que α corresponde à distância que o pulso percorreu nas partículas em relação à distância total. O contrário é igualmente válido, isto é, o percurso percorrido pelo pulso no contínuo também pode ser escrito em função de α , conforme apresentado nas expressões 4.2.

$$\alpha = \frac{\Delta S_{part}}{\Delta S_{total}} \quad (1 - \alpha) = \frac{\Delta S_{cont}}{\Delta S_{total}} \quad (4.2)$$

Os termos apresentados na Expressão 4.2 podem ser substituídos no cálculo do tempo de propagação do pulso, como apresentado na Equação 4.3, resultando na fórmula da velocidade proporcional que está em função de área tomada pelas partículas, uma vez que o caminho percorrido pelo pulso nas partículas se aproxima da área analisada. Vale destacar que, a Equação 4.3 pode ser expandida caso um novo elemento seja adicionado na análise, desde que, as simplificações adotadas nas simulações sejam respeitadas.

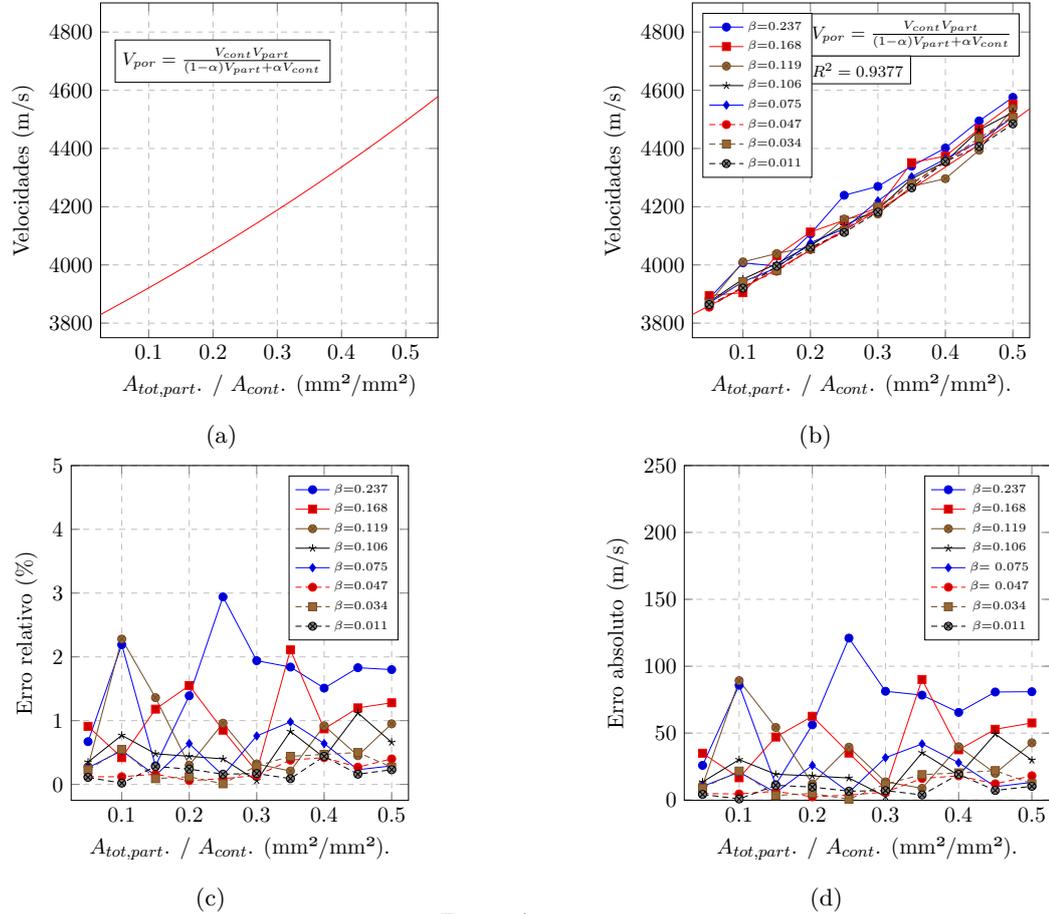
$$\Delta t = \frac{(1 - \alpha)\Delta S_{tot}}{V_{cont}} + \frac{\alpha\Delta S_{tot}}{V_{part}} \quad \longrightarrow \quad V_{prop} = \frac{V_{cont}V_{part}}{(1 - \alpha)V_{part} + \alpha V_{cont}} \quad (4.3)$$

A Equação 4.3 também foi encontrada por Lin, Lai e Yen (2003) após realizarem ensaios experimentais com o concreto, variando a proporção de agregados e a relação água cimento das misturas. Os autores concluíram que a expressão 4.3, que considera o concreto como modelo bifásico, possui boa acurácia na determinação das velocidades do concreto com idades acima de 7 dias. Essa mesma equação também foi demonstrada por Wyllie, Gregory e Gardner (1956) para o cálculo da velocidade das ondas de compressão em rochas com poros preenchidos com água.

De posse dos valores médios das velocidades dos pulsos ultrassônicos obtidos nas simulações numéricas, para cada razão entre o diâmetro da partícula e do contínuo ($\beta = D_{part}/D_{cont}$) e proporções de área analisada ($\gamma = A_{tot,part}/A_{cont}$), foram feitas comparações com os valores

calculados por meio da Equação 4.3, figura.4.3(b). Em seguida, determinou-se o erro relativo e absoluto desses resultados, como pode ser observado na figura 4.3 (c) e(d).

Figura 4.3 – Gráficos da V_{prop} (a), velocidades médias (b), erro relativo (c) e absoluto (d).



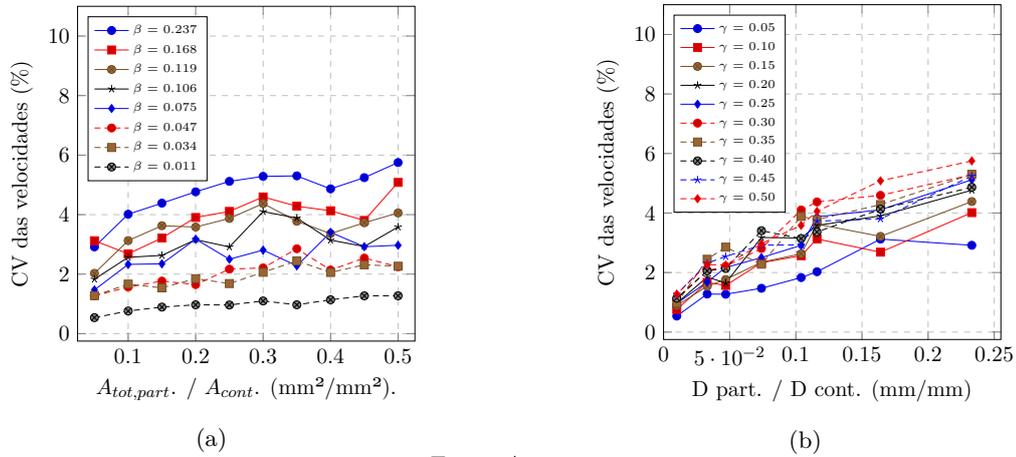
Fonte: Autor.

O erro absoluto é entendido como o módulo da diferença entre os valores, já o erro relativo é o erro absoluto dividido por um valor de referência no caso a média dos valores, como apresentado na Equação 4.4.

$$E_a = |x - \bar{x}| \qquad E_r = \frac{|x - \bar{x}|}{\bar{x}} \qquad (4.4)$$

Analisando o comportamento dos resultados através das Figura 4.3 é possível observar que a equação sugerida para a velocidade proporcional, V_{prop} , tem os menores valores dos erros relativo e absoluto. Tendo como a maior diferença um valor abaixo de 121 m/s para o erro absoluto e de aproximadamente a 2.92 % para o erro relativo (fig. 4.3 (c) e (d)), respectivamente. Já o R-quadrado encontrado para a função da velocidade proporcional (V_{prop}) quando comparado às médias numéricas das velocidades foi de 0.9377 que pode ser entendido como uma correlação adequada da equação com os resultados numéricos. A partir dos valores dos desvios padrão e das médias das velocidades foram determinados os coeficientes de variação (CV) das velocidades para cada diâmetro e proporção de áreas analisadas. Dessa forma, foi possível analisar o comportamento do CV em função desses dois parâmetros separadamente, como apresentado na figura 4.4.

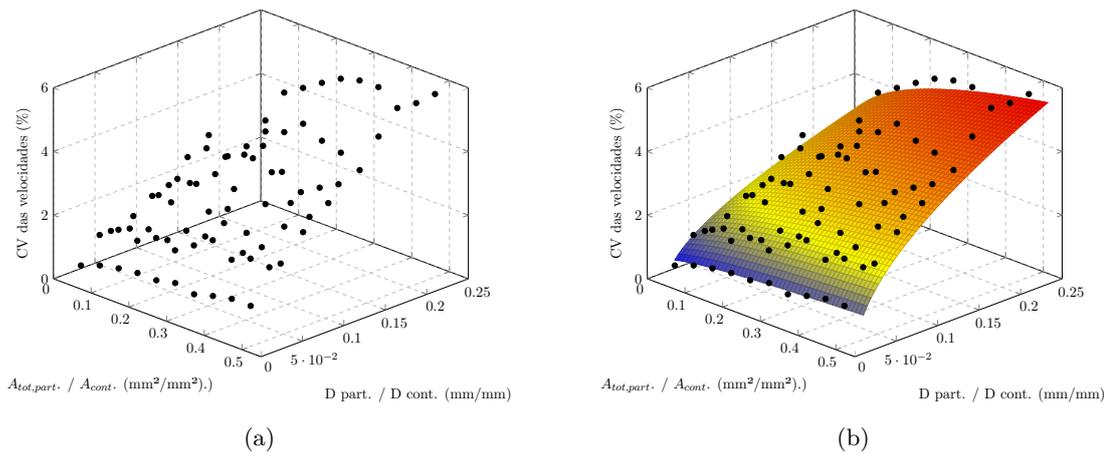
Figura 4.4 – Gráficos do CV em função da razão entre áreas (a) e em razão dos diâmetros (b).



Fonte: Autor.

O comportamento dos valores dos CV das velocidades se aproximam da função do tipo $f(x) = ax^b$, em ambos os casos. Assim, foi gerado um gráfico de dispersão 3D em função das duas variáveis analisadas (fig. 4.5) e, em seguida, foi feito o ajustamento de uma determinada curva, dada pela função do tipo $f(\beta, \gamma) = a\beta^b\gamma^c$, por meio do *Fitting*. Na função proposta, a variável β representa a razão entre os diâmetros ($\beta = D_{part}/D_{cont}$) e o γ a área tomada pelas partículas ($\gamma = A_{tot,part}/A_{cont}$). Os resultados do *fitting* são apresentados na figura 4.5 e na tabela 4.2, respectivamente.

Figura 4.5 – Gráficos dos valores de CV em função da razão entre áreas e dos diâmetros (a) e o *fitting* (b).



Fonte: Autor.

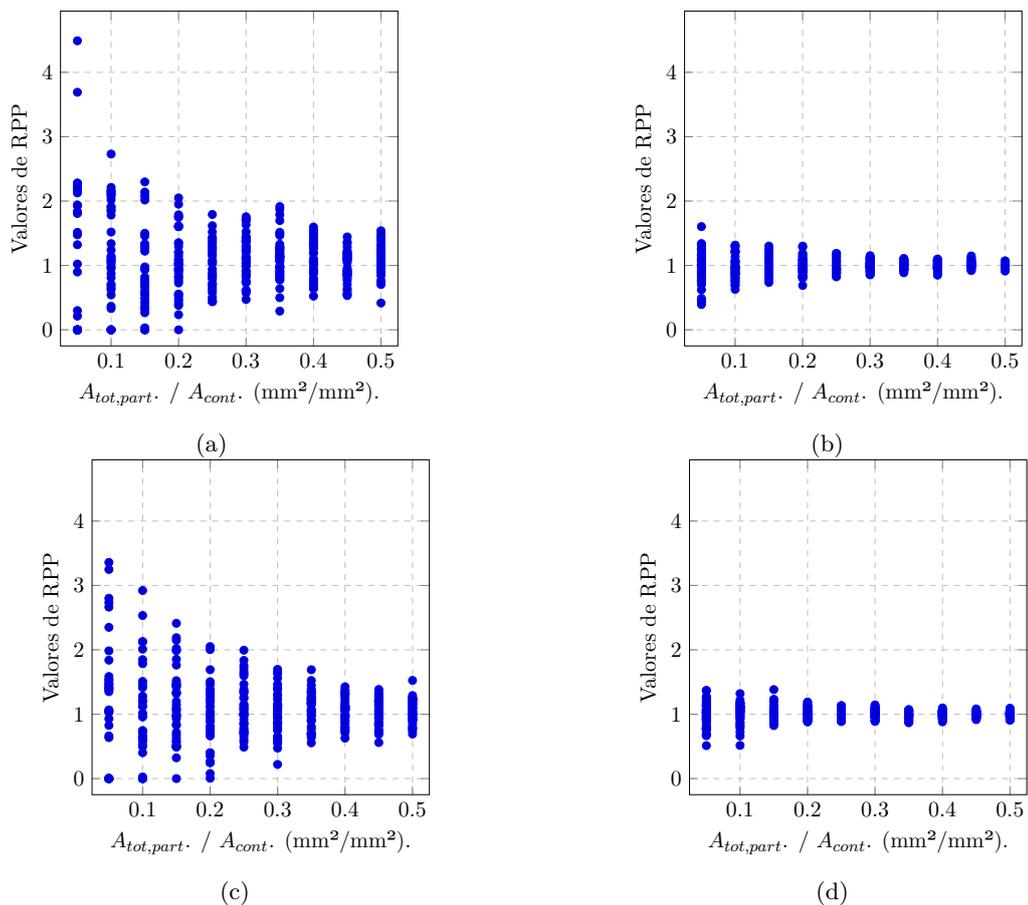
Tabela 4.2 – Fitting em função da razão entre as áreas e da razão entre os diâmetros.

Informação do Fitting		
Função proposta	Função ajustada	R^2
$f(\beta, \gamma) = a\beta^b\gamma^c$	$f(\beta, \gamma) = 13.5\beta^{0.5}\gamma^{0.2215}$	0.9334

Como pode ser observado no gráfico 4.5 (a) e (b), à medida que as razões entre os diâmetros diminuem, os CV das velocidades se mantêm baixo independente da fração de área tomada pelas partículas. Isso se deve ao fato que as partículas de menores dimensões estão distribuídas de maneira mais homogênea na seção quando comparadas às partículas de maiores dimensões.

Em termos práticos, o ensaio de pulso ultrassônico pode ser feito em peças de concreto com diferentes dimensões o que exige frequências de transdutores distintas que atendam às limitações impostas pela geometria do elemento analisado. Dessa forma, é de se esperar que a razão entre a dimensão da partícula em relação ao comprimento do percurso do pulso influencie nas medidas de velocidades, assim como nos valores de CV. Nesse sentido, foram realizadas novas simulações numéricas com diâmetros de contínuo de 500 e 750 mm, mantendo-se as mesmas dimensões para as partículas. Os resultados obtidos são apresentados na figura 4.6.

Figura 4.6 – Gráficos do RPP para os diâmetros de 500 e 750 mm, sendo o diâmetro da partícula de 58.16 mm em (a) e (c) e de 2.36 mm em (b) e (d).

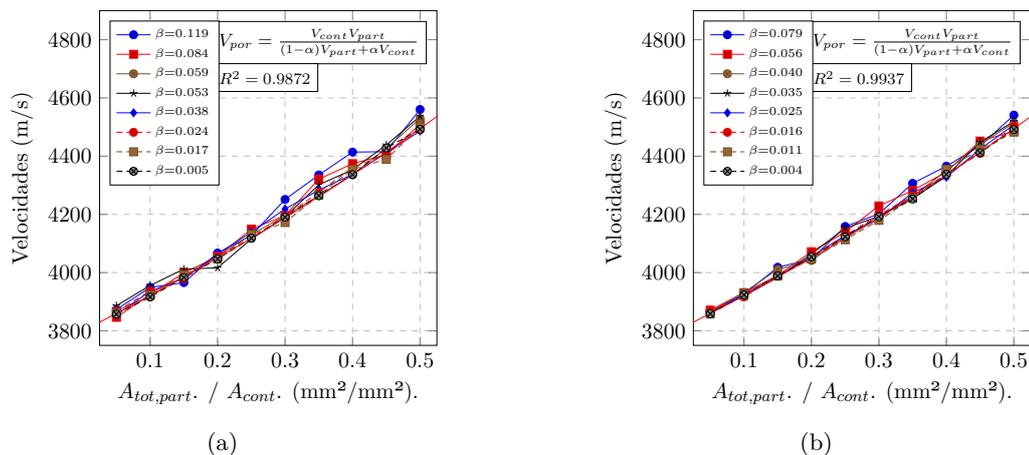


Fonte: Autor.

A partir dos resultados apresentados no gráfico 4.6 pode-se observar que os valores de RPP tiveram um comportamento semelhante aos dados já apresentados no gráfico 4.2. Em que, à medida que a razão entre a dimensão da partícula e o percurso do pulso diminui, os valores de RPP tendem a 1. Nesse sentido, a expressão da velocidade proporcional também pode ser utilizada nos casos em que a razão entre os diâmetros da partícula e do contínuo são menores.

Quanto aos resultados das velocidades dos pulsos encontrados nas simulações numéricas pode-se notar uma boa concordância com os resultados da expressão de velocidade proporcional (V_{prop}), como apresentado nos gráficos 4.7 (a) e (b). Os valores do R-quadrado encontrados para os contínuos com 500 e 750 mm foi de 0.9872 e 0.9937, respectivamente, ambos superiores ao resultado já encontrado para o contínuo de 250 mm, de 0.9377. Dessa forma, pode-se dizer que, nas simulações numéricas, a equação da V_{prop} é uma boa candidata para a previsão de velocidades quando as trajetórias percorrida pelos pulsos são consideradas retilíneas e a variação das velocidades final depende apenas da distribuição aleatória das partículas no contínuo.

Figura 4.7 – Gráficos da V_{prop} para o contínuo com diâmetro de 500 mm (a) e 750 mm (b).

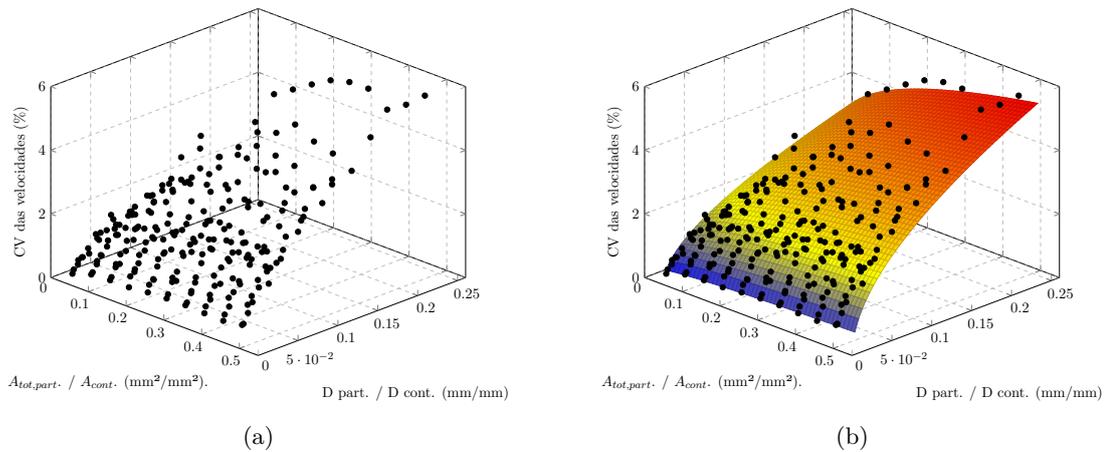


Fonte: Autor.

Os valores do erro absoluto e o erro relativo encontrado para o contínuo de 500 e 750mm foi de 77.92 m/s e 1.79 % e de 46.37 m/s e de 1.03 %, respectivamente. Nos dois casos, os valores encontrados foram menores que os valores determinados para o contínuo com 250 mm de diâmetro, sendo de 121 m/s e 2.92%, para o erro absoluto e relativo, respectivamente. Os valores de R-quadrado encontrados para os contínuos de 500 e 750 apontavam um melhor ajuste dos dados numéricos com os resultados da expressão da V_{prop} , o que reforça a ideia de que a equação da V_{prop} pode ser usada quando a razão entre o diâmetro da partícula e o percurso retilíneo do pulso apresentam valores relativamente baixos. Nesse sentido, pode ser dito que a expressão desenvolvida pode ser utilizada para estimar a velocidade em argamassas, pois possuem partículas de menores dimensões.

Após reunir os dados obtidos nas simulações numéricas de todos os contínuos analisados, foi determinado o CV das velocidades e gerado um novo gráfico de dispersão 3D (figura 4.8) e, em seguida, foi feito o *fitting* com a mesma equação adotada no procedimento anterior $f(\beta, \gamma) = a\beta^b\gamma^c$, mantendo-se as mesmas simplificações, em que as trajetórias dos pulsos são retilíneas e as partículas possuem a mesma dimensão.

Figura 4.8 – Gráficos dos valores CV para todos os diâmetros do contínuo (a) e o *fitting* dos valores (b).



Fonte: Autor.

Tabela 4.3 – Fitting com todos os diâmetros analisados.

Informação do Fitting		
Função proposta	Função ajustada	R^2
$f(\beta, \gamma) = a\beta^b\gamma^c$	$f(\beta, \gamma) = 13.5\beta^{0.5}\gamma^{0.21376}$	0.9410

Na tabela 4.3, é apresentada a equação do *fitting* obtida com todos os valores de todas as simulações analisadas. A equação teve alguns termos fixados sendo: $a = 13.5$ e $b = 0.5$, para que a equação resultante se tornasse próxima da expressão determinada anteriormente - $f(\beta, \gamma) = 13.5\beta^{0.5}\gamma^{0.2215}$, já o expoente da variável ' γ ' ficou livre para que o processo de *fitting* encontrasse o melhor valor de modo que a equação se ajustasse a todos os pontos. Como pode ser visto a expressão obteve um R-quadrado superior ao já determinado de 0.9334. Este resultado se apresentou bem ajustado à curva e isso deve-se à maior quantidade de pontos para a realização do *fitting* e, além disso, os pontos possuem um comportamento bem definido como pode ser observado na figura 4.8 (a). Resultando assim, no valor do R-quadrado de 0.9410, demonstrando que a função escolhida é bem adequada para representar o comportamento do CV das velocidades.

Foi realizado o teste da Análise da Variância (ANOVA) para verificar se as médias das velocidades obtidas para os diferentes diâmetros do contínuo são realmente distintas. Para aplicar o teste Anova, são necessários que os dados atendam a determinados critérios, dentre eles que: as observações sejam independentes, o que ocorre para cada contínuo; Os grupos apresentem a mesma variância, para essa finalidade é necessário realizar o teste de Levene; E por fim, que os dados sejam provenientes de uma distribuição normal, como as médias das velocidades foram calculadas a partir de 40 valores obtidos das simulações numéricas foi adotado o teste de Kolmogorov-Smirnov (FÁVERO; BELFIORE, 2017) - os resultados indicaram que os dados seguem uma distribuição normal. Já o critério de análise das variâncias realizada pelo teste de Levene não foi atendido. Desta forma, não foi possível dizer com o rigor estatístico que as médias das velocidades de cada contínuo são realmente distintas. Acredita-se que, uma saída seja

realizada uma maior quantidade de medidas de velocidades em cada simulações a fim de tornar as variâncias homogêneas.

Como os resultados seguem uma distribuição normal, a expressão 4.5 pode ser utilizada para prever a velocidade do pulso, uma vez que, o valor da V_{prop} é entendida como a média das velocidades e, a partir da equação apresentada na tabela 4.3 determina-se o CV, em que é possível estabelecer as faixas de valores para as velocidades. Assim é possível conhecer a região onde existe a probabilidade das medidas numéricas das velocidades ocorrerem.

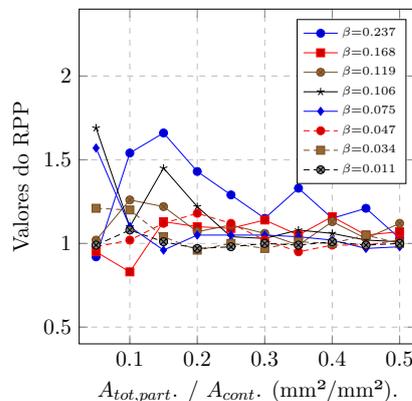
$$f(V_{part}, V_{cont}, \beta, \gamma) = V_{prop}(1 \pm 13.5\beta^{0.5}\gamma^{0.21376}) \quad (4.5)$$

Na seção a seguir é estudada como as diferentes velocidades do pulso nas partículas influenciam as medidas das velocidades numéricas e, por fim, é implementada essa nova variável na equação do CV das velocidades.

4.2 Análise 2 - Diferentes valores de velocidade para as partículas

A velocidade de propagação do pulso ultrassônico em meios heterogêneos varia de acordo com as propriedades mecânicas dos constituintes visto que as ondas mecânicas ficam sujeitas aos efeitos da reflexão, refração e difração, quando percorrem meios com diferentes materiais. Nesse sentido, foram realizadas simulações numéricas com o objetivo de avaliar o comportamento dos CV das velocidades para diferentes mapas de velocidades, ou seja, quando as velocidades das partículas analisadas variaram em relação à velocidade do contínuo. Vale destacar que, as mesmas simplificações adotadas nos modelos anteriores foram mantidas nessa etapa do trabalho. Além disso, as posições das partículas no contínuo não sofreram nenhuma alteração logo, pode-se afirmar que a distância percorrida pelo pulso ultrassônico nas partículas se manteve constante, permitindo que a análise de diferentes velocidades das partículas fossem estudadas de maneira isolada. Na figura 4.9, são representados os valores do RPP que foram adotados para todas as simulações realizadas nesta etapa do trabalho.

Figura 4.9 – Valores de RPP para o contínuo com diâmetro de 250 mm.



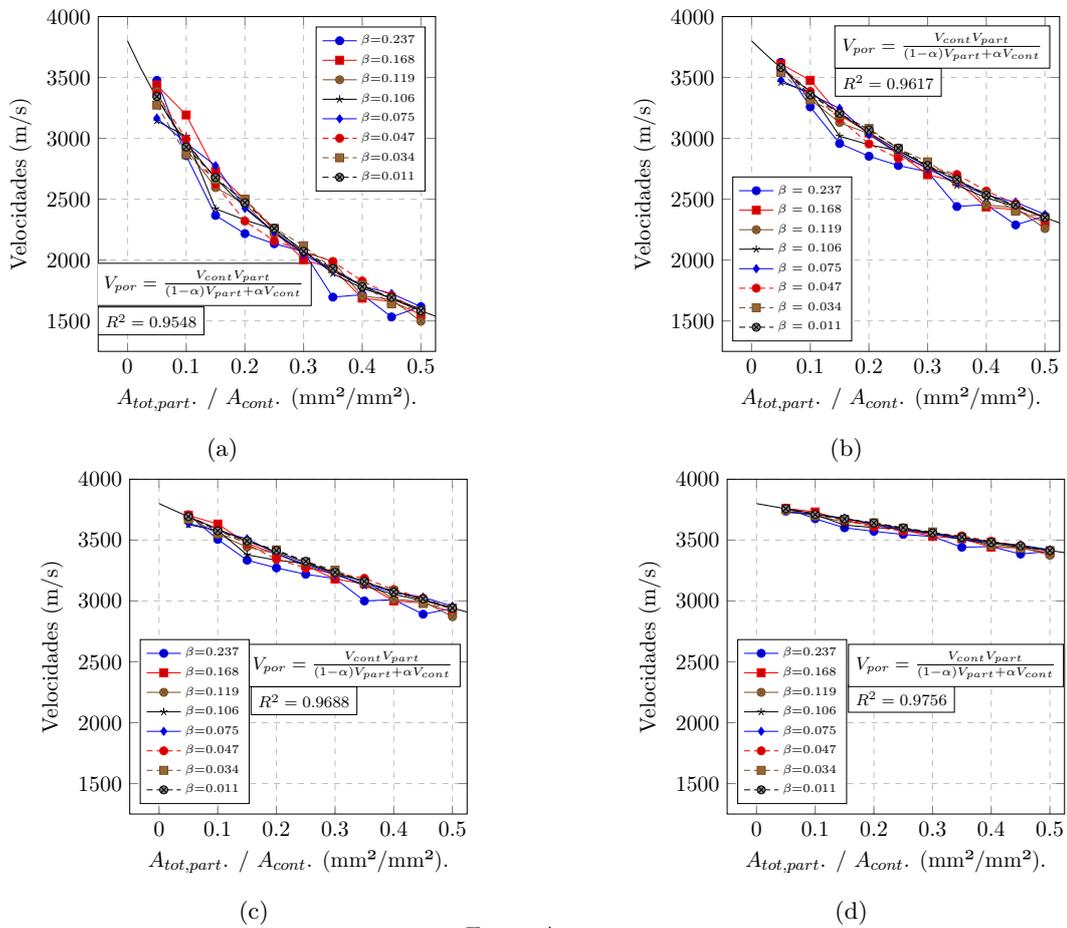
Fonte: Autor.

No gráfico 4.9, são apresentados os valores médios dos RPP de todos os tamanhos das partículas. Já o diâmetro adotado para o contínuo foi de 250 mm. Como pode ser observado na figura 4.9, a medida que a área tomada pelas partículas aumentam, os valores de RPP tendem a 1, independente da dimensão das partículas. Nesse sentido, a expressão utilizada para determinar a V_{prop} também pode ser empregada para o cálculo das velocidades dos pulsos nessa etapa das simulações numéricas.

Os principais fenômenos que ocorrem quando as ondas mecânicas se propagam em meios com diferentes propriedades mecânicas são as reflexões e as refrações. Quanto maior a diferença entre as propriedades dos meios, maior é a intensidade desses fenômenos. Nas simulações numéricas não foram consideradas os efeitos da reflexão e da refração, pois as trajetórias adotadas são sempre retilíneas, se distanciando do que ocorre num modelo experimental. O princípio de Fermat também não foi atendido nas análises, ou seja, o caminho percorrido pelo pulso nas simulações não passou de trajetória de menor tempo e sim, se manteve constante e retilínea durante todas as simulações.

Para a análise de diferentes velocidades das partículas, manteve-se constante a velocidade do contínuo de 3800 m/s e modificou-se a velocidade das partículas no intervalo de 1000 a 6600 m/s, aumentando-se o valor da velocidade na proporção de 700 m/s. Nas Figuras 4.10 (a), (b), (c) e (d), são apresentados os valores das médias das velocidades em função da área tomada pelas partículas quando a velocidade das partículas são menores que a velocidade do contínuo - 1000, 1700, 2400 e 3100 m/s, respectivamente, assim como o traçado da curva da V_{prop} , que está em função das velocidades do contínuo e da partícula e, também, da área das partículas.

Figura 4.10 – Gráficos das velocidades V_{cont} - 3800 m/s, maior que a V_{part} - (a) 1000, (b) 1700, (c) 2400 e (d) 3100 m/s.



Fonte: Autor.

O comportamento da equação da V_{prop} apresentou uma boa aproximação com valores médios das velocidades obtidas das simulações numéricas, fato que é confirmado quando se observa os valores de r-quadrado, que ficaram entre 0.9548 e 0.9756. Nessa etapa, em que a velocidade da partícula é menor que a velocidade do contínuo, foi possível verificar que as médias das velocidades diminuem à medida que a fração de área tomada pelas partículas aumentam, sendo mais evidentes nos modelos que possuem as maiores diferenças, parte (a) e (b) da figura 4.10. Apontando que esse parâmetro tem impacto relevante nas medidas de velocidade da simulações numéricas. Já na tabela 4.4, são apresentados os valores dos erros relativos e absoluto para cada velocidade. Onde, é reforçado mais uma vez que, as maiores diferenças de velocidades implicam em maiores valores de erros.

Tabela 4.4 – Erros relativos e absolutos para cada velocidade das partículas.

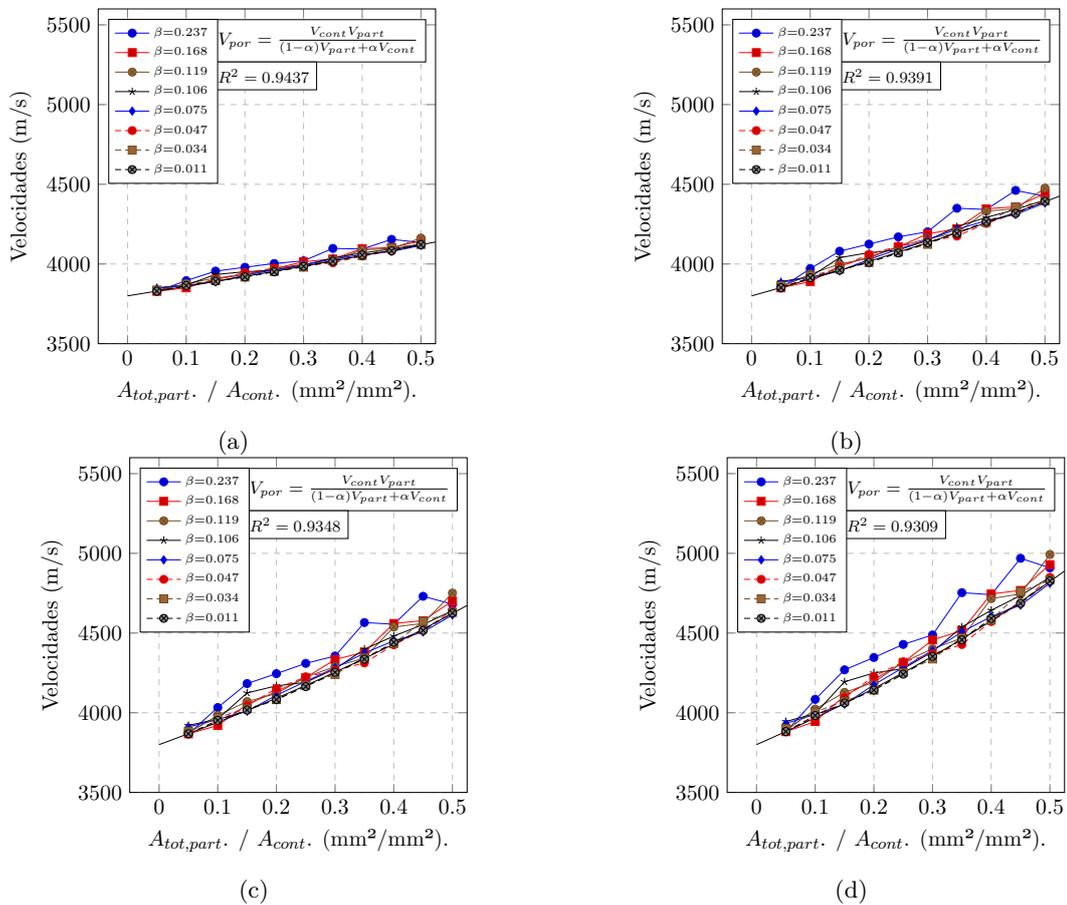
V_{part} (m/s)	E_a (m/s)	E_r (%)
1000	309.52	11.88
1700	248.56	7.92
2400	159.29	4.62
3100	80.10	2.19

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos nesta etapa do trabalho e apresentados na figura 4.10, apresentam boa concordância com os resultados dos estudos realizados por Vergara *et al.* (2001) na qual, foi verificado que o aumento da porosidade na argamassa associado ao aumento da relação a/c diminuem as medidas das velocidades do pulsos (fig:2.12). Nesse sentido, caso as baixas velocidades das partículas nas simulações numéricas pudessem ser associadas a possíveis vazios ou poros, a expressão da V_{prop} se apresenta como uma boa candidata para a estimativa de velocidades do pulso ultrassônico nesse contexto.

Nos resultados apresentados nas Figuras 4.11 (a), (b), (c) e (d), foram feitas as simulações numéricas com os valores das velocidades das partículas superiores à velocidade do contínuo.

Figura 4.11 – Gráficos das velocidades do V_{cont} - 3800 m/s, e das partículas de V_{part} - (a) 4500, (b) 5200, (c) 5900 e (d) 6600 m/s.



Fonte: Autor.

Através da figura 4.11, foi possível identificar que os valores das velocidades aumentam à medida que a proporção da área tomada pelas partículas aumenta, o que já era esperado. Além disso, esses resultados estão de acordo com o que foi afirmado por Malhotra e Carino (2004), em que a velocidade do pulso no concreto é afetada pela quantidade de agregados graúdos presente na sua composição, pois, a velocidade dos agregados geralmente são maiores que a velocidade da pasta cimentícia. Os resultados obtidos para as velocidades das partículas maiores que a velocidade do contínuo também apresentaram boas correlações com a equação da V_{prop} , como pode ser visto através dos valores do r-quadrado que ficaram entre 0.9437 e 0.9309. Nesse sentido,

pode-se dizer que a expressão usada para determinar os valores das velocidades, V_{prop} , atende bem as estimativas das velocidades dos pulsos quando os valores das velocidades das partículas são maiores ou menores que a velocidade do contínuo.

Tabela 4.5 – Erros relativos e absolutos para cada velocidade das partículas.

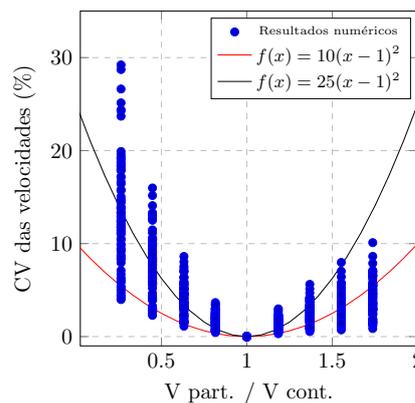
V_{part} (m/s)	E_a (m/s)	E_r %
4500	78.97	1.96
5200	154.27	3.65
5900	224.91	5.13
6600	290.65	6.43

Fonte: Autor.

Nas tabelas 4.4 e 4.5, demonstra-se que as velocidades das partículas que estão mais próximas da velocidade do contínuo, 3100 e 4500 m/s, apresentam os menores erros relativos e absolutos. E tendem a aumentar à medida que os valores das velocidades são maiores.

Na figura 4.12, é apresentado o comportamento dos CV das velocidades em função da razão entre as velocidades da partícula e do contínuo. Como pode ser observado, os maiores valores do CV estão relacionados às menores velocidades das partículas. Por outro lado, quando as velocidades das partículas são maiores que a velocidade do contínuo, os valores do CV são também evidentes, porém menores. Já no cenário, em que a razão entre as velocidades do contínuo e das partículas é igual a 1, o meio pode ser entendido como um material homogêneo. Nesse caso, o CV das velocidades é igual a zero, independentemente da dimensão das partículas ou da área ocupada no contínuo.

Figura 4.12 – Comportamento do CV em função da razão entre as velocidades.



Fonte: Autor.

A partir da figura 4.12, é possível inferir que o comportamento dos valores de CV se apresentam de maneira distinta quando a velocidade da partícula é menor que a velocidade do contínuo ou quando é maior. Assim, foram propostas duas expressões 4.6 e 4.7 que têm como objetivo descrever esses comportamentos. Dessa forma, foi feita uma suposição em que a distância percorrido por determinado pulso é igual a $\Delta s = 2D$. Assim, quando a velocidade da partícula tende ao infinito, a parcela de tempo correspondente às partículas se aproxima de 0, resultando numa velocidade duas vezes maior que a do contínuo, como apresentado pela expressão 4.6. Já

no segundo caso, em que a velocidade da partícula é menor que a do contínuo e tende a zero, o tempo total de propagação do pulso se aproxima do infinito resultando no valor da velocidade final igual a 0, expressão 4.7.

$$\lim_{V_{part} \rightarrow \infty} \Delta t = \frac{D}{V_{cont}} + \frac{D}{V_{part}} \xrightarrow{0} \Delta t = \frac{D}{V_{cont}} \rightarrow V_{final} = 2V_{cont} \quad (4.6)$$

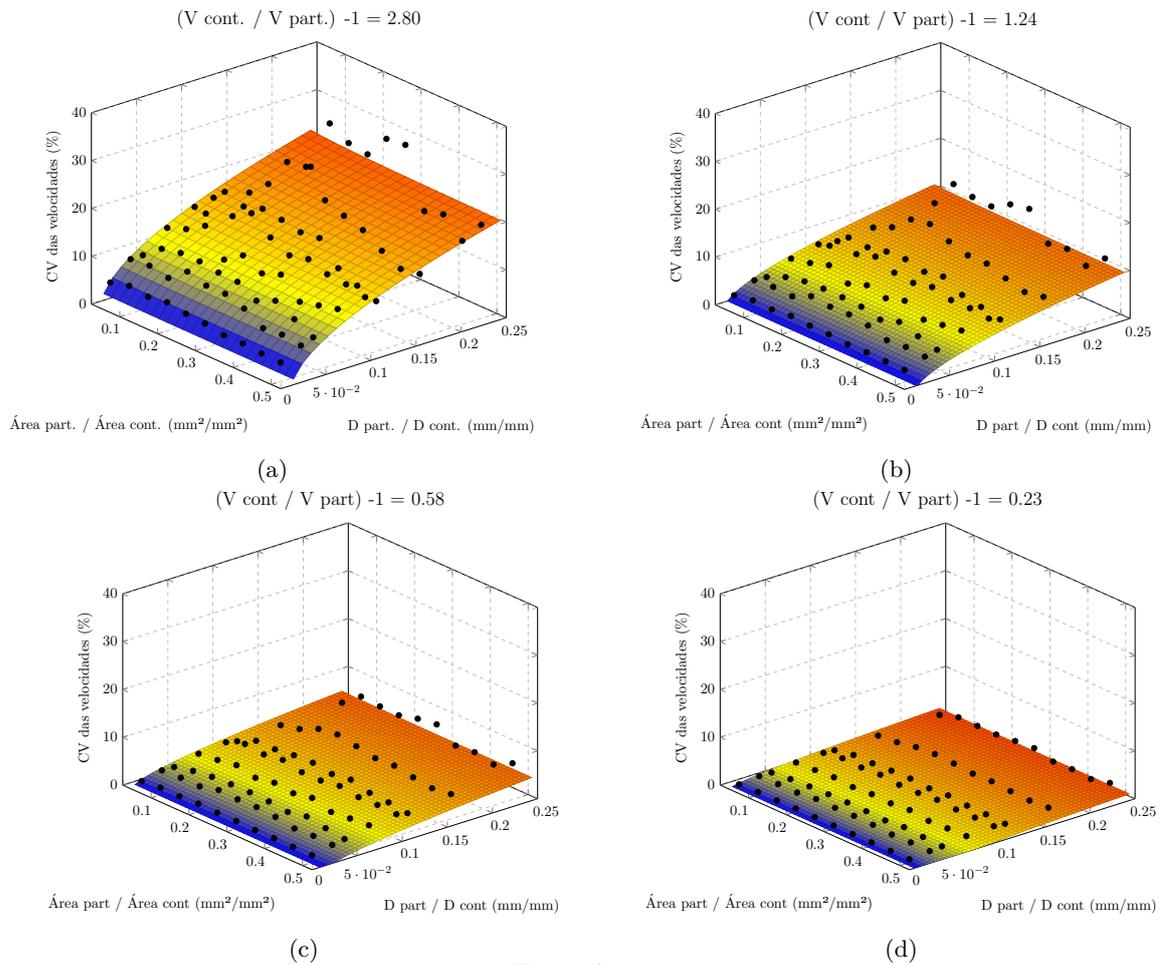
$$\lim_{V_{part} \rightarrow 0} \Delta t = \frac{D}{V_{cont}} + \frac{D}{V_{part}} \xrightarrow{\infty} \Delta t = \infty \rightarrow V_{final} = 0 \quad (4.7)$$

Após essa abordagem, foi feito um *fitting* para as velocidades das partículas menores que a do contínuo e outro para as velocidades maiores. Isso se deve ao fato que, ao realizar apenas um *fitting* com todos os valores das velocidades, o r-quadrado obtido apresentou uma baixa correlação.

A função adotada para descrever o comportamento dessa variável em ambos os *fitting* foi do tipo $f(\eta) = k(\eta - 1)^a$. Representadas pelas linhas preta e vermelha na (fig. 4.12). Em que o valor de η_1 foi adotado como sendo a razão V_{cont}/V_{part} quando as velocidades das partículas são menores que a velocidade do contínuo, e η_2 quando a razão é V_{part}/V_{cont} . Nesse caso, as velocidades das partículas são maiores que a do contínuo. Esse critério foi usado, pois a função se aproximou bem dos valores de CV exibidos na figura 4.12.

A função final adotada para o *fitting* foi $f(\beta, \gamma, \eta) = a\beta^b\gamma^c\eta^d$. A função proposta teve alguns dos seus coeficientes constantes com valores fixados em $a = 20$, $b = 0.5$ e $d = 0.8$. A variável c ficou livre para a realização do ajuste de curva. O processo de fixar as variáveis foi realizado simultaneamente para a análise das velocidades maiores e menores que a velocidade do contínuo. A variável η representa a razão entre as velocidades como discutido anteriormente. Nas Figuras 4.13 (a), (b), (c) e (d) são apresentados os resultados numéricos para a velocidade das partículas maiores que a do contínuo, assim como, as curvas dos *fitting* para cada caso analisado, também é apresentado a tabela 4.6 com os resultados do processo.

Figura 4.13 – Gráficos das velocidades V_{part} maior que a V_{cont} .



Fonte: Autor.

Tabela 4.6 – Fitting em função das razão entre as velocidades.

Informação do fitting		
Função proposta	Função ajustada	R ²
$f(\beta, \gamma, \eta) = a\beta^b\gamma^c\eta^d$	$f(\beta, \gamma, \eta) = 20\beta^{0.5}\gamma^{0.08393}\eta^{0.8}$	0.9022

Os mesmos procedimentos foram realizados para a simulação em que a velocidade da partícula é menor que a velocidade do contínuo como pode ser observado nas Figuras 4.14 (a), (b), (c) e (d) e na tabela 4.7.

Figura 4.14 – Gráficos das velocidades V_{part} menor que a V_{cont} .

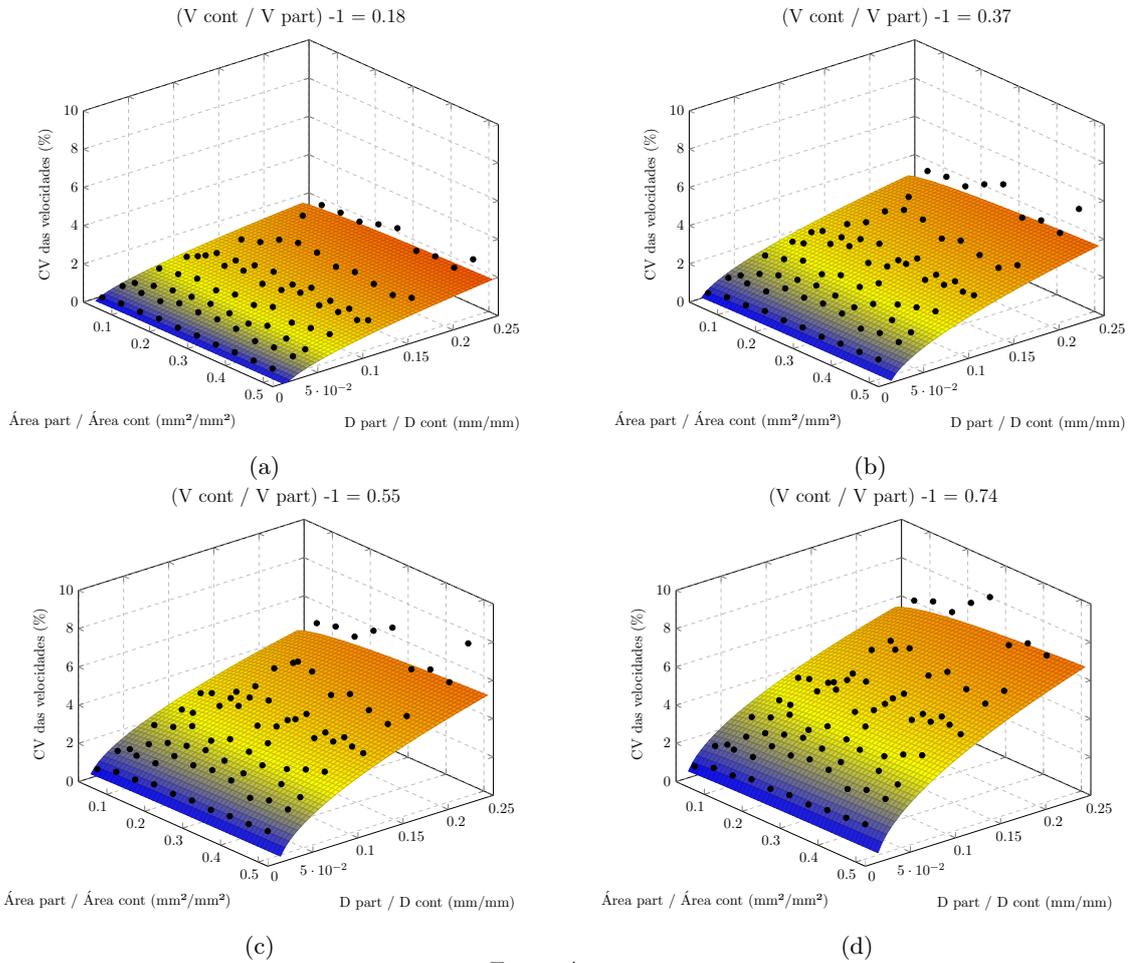


Tabela 4.7 – Fitting em função da razão entre as velocidades.

Informação do fitting		
Função proposta	Função ajustada	R^2
$f(\beta, \gamma, \eta) = a\beta^b\gamma^c\eta^d$	$f(\beta, \gamma, \eta) = 20\beta^{0.5}\gamma^{-0.02116}\eta^{0.8}$	0.9022

Os testes de normalidade foram realizados para verificar se as medidas de velocidades seguem uma distribuição normal, quando a velocidade das partículas são maiores ou menores que a do contínuo também foram feitos. Os resultados apontaram que as medidas das velocidades seguem uma distribuição normal utilizando o método de Kolmogorov-Smirnov em todas as análises. Assim, é possível afirmar que a expressão para calcular o CV da velocidade pode ser usada para determinar a faixa de valores das velocidades em torno da média.

No que diz respeito ao teste ANOVA, não foi possível verificar estatisticamente se as médias das velocidades são distintas quando se variam as velocidades das partículas, pois os dados não possuem variâncias iguais, ou seja, não atendeu ao teste de Levene. Apesar disso, é aceitável

dizer que as velocidades das partículas distintas resultem em valores médios diferentes, inferindo-se que há a possibilidade das médias serem distintas em cada situação dado o comportamento dos resultados apresentados nas Figuras 4.13 e 4.14 (a), (b), (c) e (d).

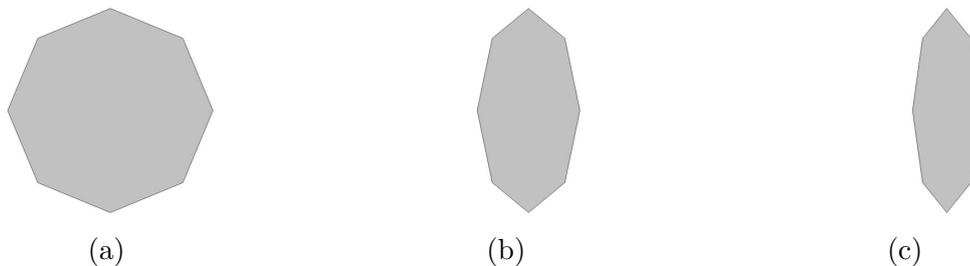
4.3 Análise 3 - Fator de Forma das partículas

O Fator de Forma (FF) da partícula é discutido e analisado quando se deseja obter a trabalhabilidade necessária para que o concreto atenda aos requisitos impostos no projeto estrutural. Essa característica dos agregados graúdos influencia diretamente nas propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no endurecido. A ABNT NBR 7809 (2019) estabelece o procedimento para o cálculo do índice de forma dos agregados graúdos, sendo apresentada a expressão 4.8. Em que o $c_{méd}$ e $e_{méd}$, é o comprimento e a espessura média, respectivamente, dos agregados medidos por meio do paquímetro.

$$I = \frac{c_{méd}}{e_{méd}} \quad (4.8)$$

Nas simulações numéricas, o fator de forma (FF) altera a área das partículas que serão geradas pelo TUSom. Para o fator de forma igual a 2 e 3 é necessária uma quantidade de partículas de duas e três vezes maior, respectivamente, para atender as mesmas frações de áreas analisadas nos estudos iniciais, ou seja, quando o FF das partículas foi igual a 1 (Figura 4.15).

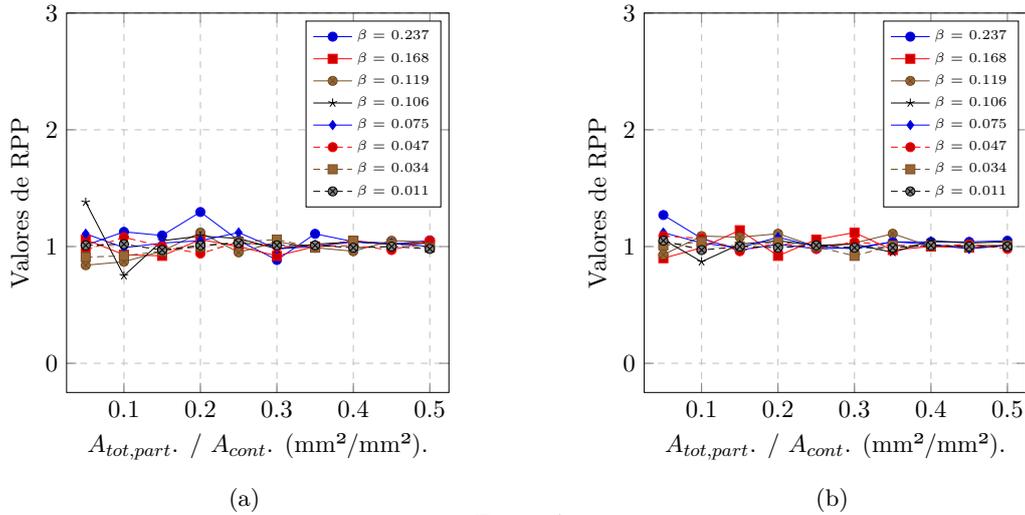
Figura 4.15 – Fator de forma das partículas: (a) FF=1, (b) FF=2 e (c) FF=3.



Fonte: Autor.

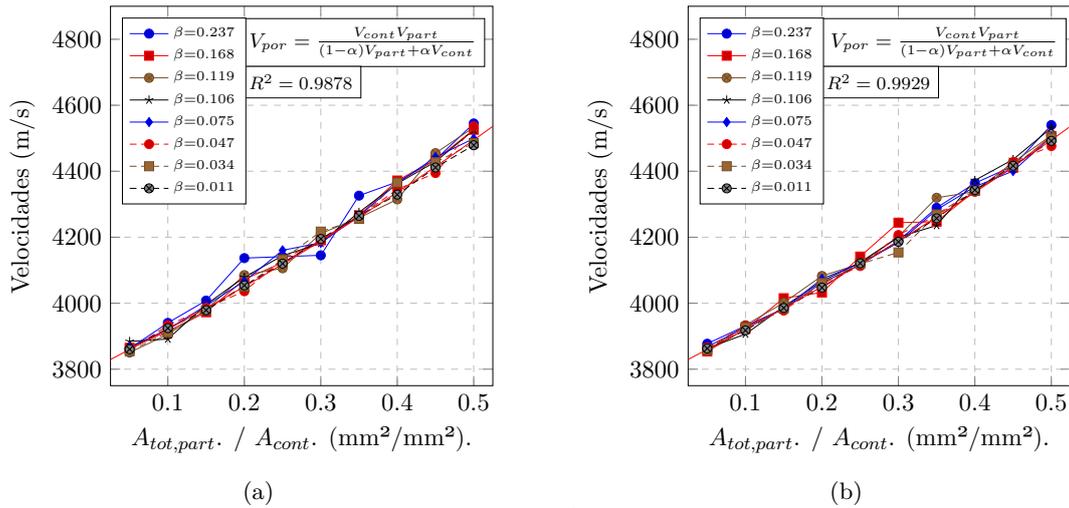
Na figura 4.16 é apresentada os valores de RPP obtidos nas simulações numéricas quando o FF das partículas foi igual a 2 e 3. Como pode ser observado, os resultados tendem a estarem mais próximos do valor 1, pois a medida que mais partículas são necessárias para atender as proporções de áreas analisadas torna-se mais difícil a possibilidade das linhas de medições não interceptá-las. Dessa forma, é de se esperar que os valores do RPP e das velocidades tenham menores desvios. Esse resultados são apresentados nas Figuras 4.16 e 4.17.

Figura 4.16 – Contínuo de 250 mm com partículas com FF = 2 (a) e FF = 3 (b).



Fonte: Autor.

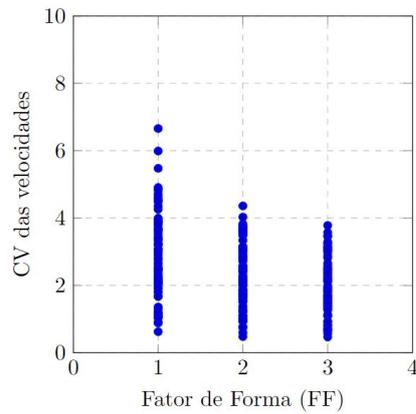
Figura 4.17 – Gráfico das V_{prop} para partículas com FF = 2 (a) e FF = 3 (b).



Fonte: Autor.

Os valores calculados para os erros absoluto e relativos foi de 86.36 m/s e 2.12 % para o FF = 2 e de 58.61 m/s e 1.37 % para FF = 3, respectivamente. Os valores do R-quadrado também apontaram um bom ajuste da função V_{prop} com os resultados numéricos obtidos, indicando que a expressão da V_{prop} também pode ser utilizada para a determinação das velocidades quando o concreto possui partículas com FF diferentes de 1. Para o estudo do *fitting*, foi gerado o gráfico 4.18. Nele, é possível avaliar o comportamento do CV das velocidades em função do FF, sendo evidente que a medida que o FF da partícula aumenta há uma redução nos CVs das velocidades. Esse fato pode ser atribuído a maiores quantidade de quantidades de partículas presente no contínuo.

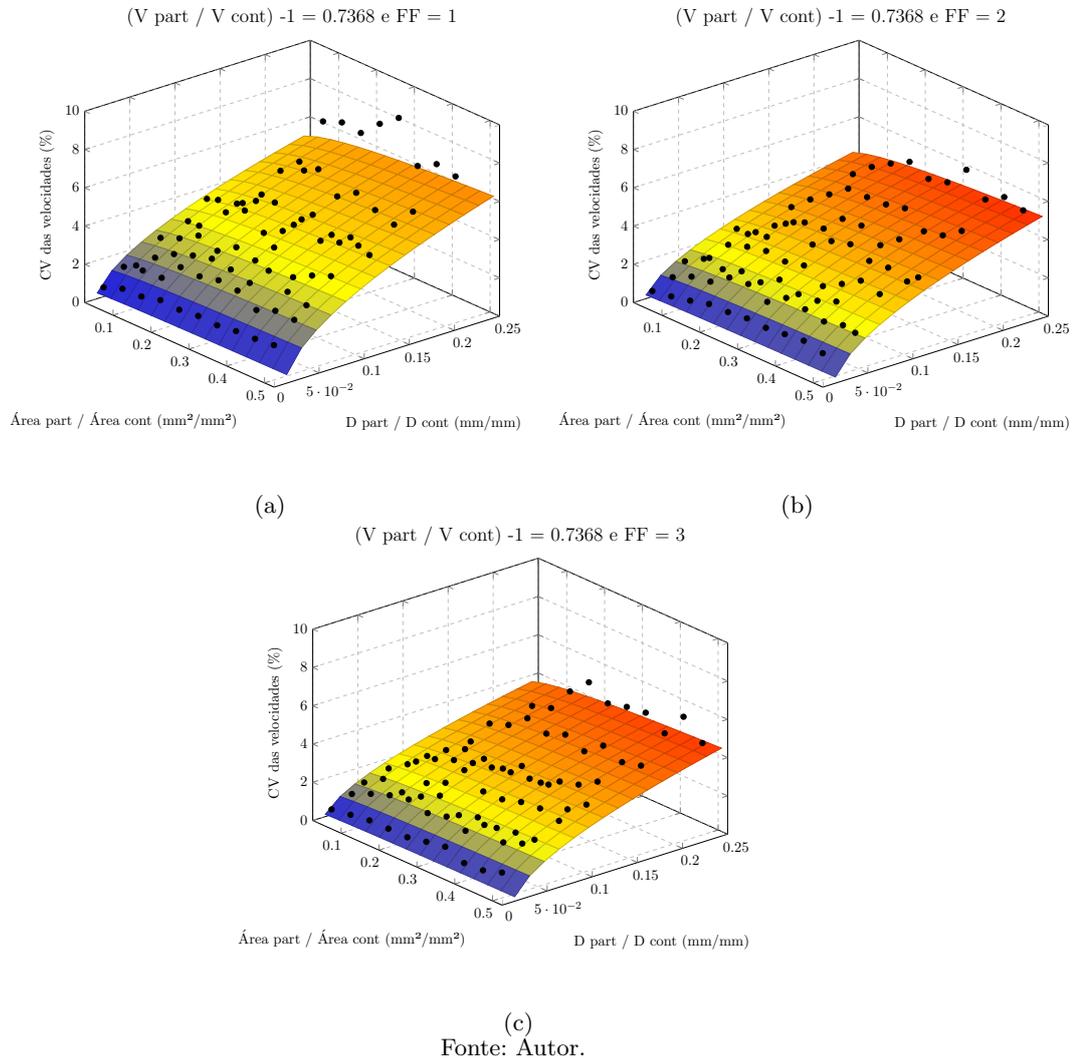
Figura 4.18 – Comportamento dos valores do CV das velocidades em função do FF.



Fonte: Autor.

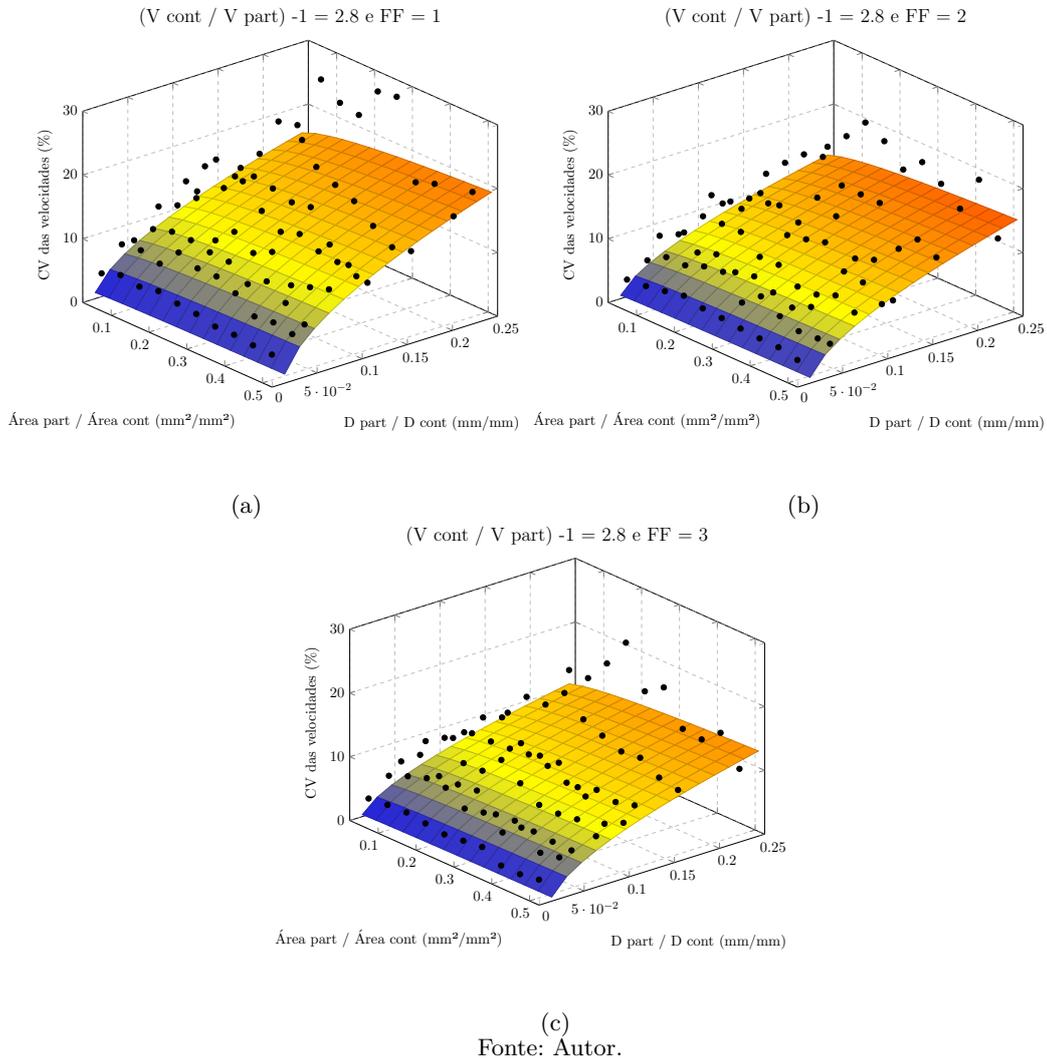
Com o intuito de avaliar a influência dos FF na função que define o comportamento do CV foram gerados gráficos 3Ds com os resultados das simulações numéricas mantendo-se a velocidade fixa para o contínuo de 3800 m/s, e de 6600 m/s e 1000m/s para as partículas. Esses são o maior e o menor valor de velocidade adotadas para as partículas neste trabalho. Os resultados dos CVs são representadas nas Figuras 4.19 e 4.20 (a), (b) e (c), correspondendo ao FF igual a 1, 2 e 3 respectivamente.

Figura 4.19 – Comportamento do CV em função do $FF = 1$ (a), $FF = 2$ (b) e $FF = 3$ (c), $V_{cont} = 3800$ e $V_{part} = 6600$ m/s.



Nos gráficos 4.19 e 4.20 (a), (b) e (c), são apresentados com mais clareza os impactos que a quantidade de partículas tem nos valores dos CV das velocidades. Onde, para os FF iguais a 2 e 3 são observadas uma tendência de menores valores dos CV, mesmo quando a diferença entre a velocidade da partícula e do contínuo é a maior dentro dos valores analisados. Além disso, a superfície gerada pela curva obtida do *fitting* estão mais próximas dos resultados obtidos nas simulações numéricas, indicando assim que, a expressão encontrada no processo de *fitting* está descrevendo de maneira satisfatória o comportamento do CV. Isso se deve ao fato de que, quando as partículas possuem o formato lamelares e alongadas, são necessárias maiores quantidades para atender as mesmas proporções de áreas já analisadas.

Figura 4.20 – Comportamento do CV em função do FF = 1 (a), FF = 2 (b) e FF = 3 (c), $V_{cont} = 3800$ e $V_{part} = 1000$ m/s.



A partir dos resultados obtidos quando a velocidade da partícula é superior a do contínuo foi feito o processo de *fitting*, na qual é analisada a razão entre os diâmetros, proporção de áreas das partículas, razão entre as velocidades e por último o fator de forma das partículas, representadas pelas variáveis β , γ , η e ν , respectivamente. A função adotada foi do tipo $f(\beta, \gamma, \eta, \nu) = a\beta^b\gamma^c\eta^d\nu^e$ e, os resultados são apresentados nas tabelas 4.8 e 4.9, assim como o r-quadrado da função proposta.

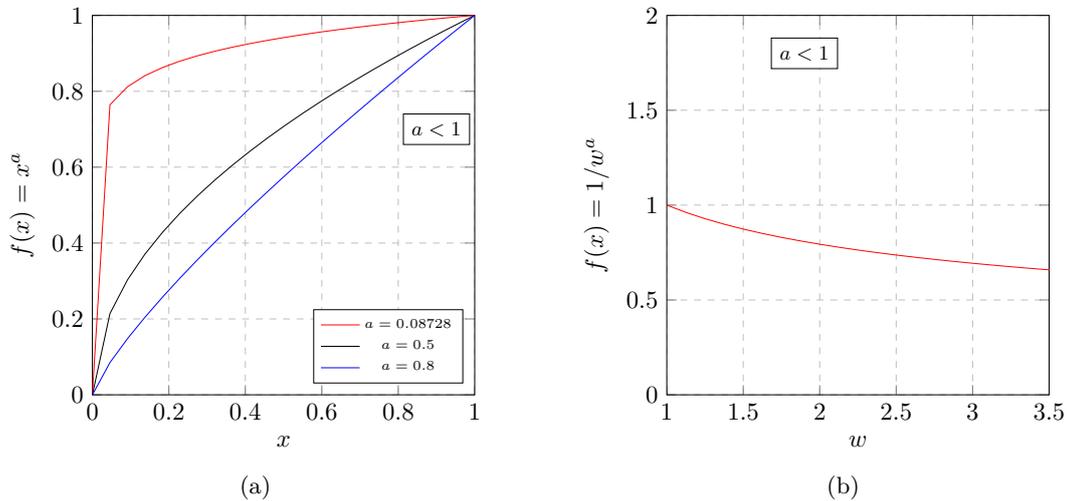
Tabela 4.8 – Fitting para a V_{part} maior que a V_{cont} .

Informação do fitting		
Função proposta	Função ajustada	R^2
$f(\beta, \gamma, \eta, \nu) = a\beta^b\gamma^c\eta^d\nu^e$	$f(\beta, \gamma, \eta, \nu) = 20\beta^{0.5}\gamma^{0.08728}\eta^{0.8}\nu^{-0.3333}$	0.9108

Tabela 4.9 – Fitting para a V_{part} menor que a V_{cont} .

Informação do fitting		
Função proposta	Função ajustada	R ²
$f(\beta, \gamma, \eta, \nu) = a\beta^b\gamma^c\eta^d\nu^e$	$f(\beta, \gamma, \eta, \nu) = 20\beta^{0.5}\gamma^{-0.02702}\eta^{0.8}\nu^{-0.3333}$	0.9169

As funções apresentadas nas tabelas 4.8 e 4.9 têm o desempenho definido pelo comportamento de duas funções básicas do tipo $f(x) = x^a$ e $f(x) = 1/x^a$, em que o valor de $a < 1$. Para uma melhor visualização do comportamento dessas funções foram gerados os gráficos para a equação da tabela 4.8, como é apresentado na figura 4.21.

Figura 4.21 – Comportamento das funções que compõem o *fitting*.

Fonte: Autor.

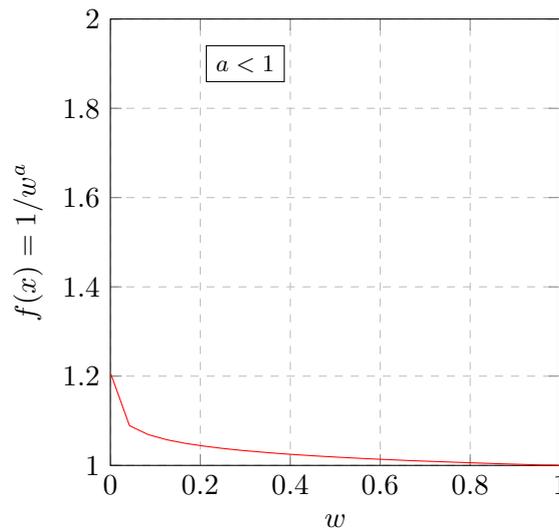
A função do tipo $f(x) = x^a$, apresentada no gráfico 4.21 (a), define o comportamento da variáveis β, γ e η , sendo a razão entre os diâmetros, área tomada pelas partículas e a razão entre as velocidades. Quando o valor da razão entre os diâmetros é baixa ($\beta \approx 0$), indica que as partículas têm o diâmetro muito pequeno e podem não ser interceptadas pelas linhas de medições caso a área tomada pelas partículas também seja baixa ($\gamma \approx 0$). Nesse cenário, há poucas partículas no contínuo e o valor de CV das velocidades, dado por $f(\beta, \gamma, \eta, \nu)$, se aproxima de 0, e, à medida que a área tomada pelas partículas aumenta, há conseqüentemente, uma maior quantidade de partículas, o que resulta no aumento nos valores do CV.

Quando $\beta = 1$, pressupõe que todo o caminho percorrido pelas às linhas de medições passaram pelas partículas, ou seja, ocorre quando o contínuo é a própria partícula. Como conseqüência, a área tomada pelas partículas é igual a 100%, resultando em $\gamma = 1$. Por outro lado, o valor da variável η será igual a 0, pois a função que define essa variável é dada por $f(\eta) = V_{part}/V_{cont} - 1$, quando a $V_{part} > V_{cont}$ e $f(\eta) = V_{cont}/V_{part} - 1$, quando a $V_{part} < V_{cont}$, logo a função $f(\beta, \gamma, \eta, \nu)$ será igual a 0. Já que o contínuo é a própria partícula.

Por fim, quando a área tomada pelas partículas é nula ($\gamma = 0$) a função $f(\beta, \gamma, \eta, \nu)$ será igual a 0, independente da diferença das velocidades do contínuo em relação às partículas ou do fator de forma, pois, nesse caso, não há nenhuma partícula no contínuo. Para as proporções de áreas entre 0 e 1, o comportamento do CV é regido pelo produto das funções que descreve a razão entre os diâmetros, que por sua vez, define a quantidade de partículas, a razão entre as velocidades e o fator de forma (FF).

A equação apresentada na tabela 4.9 também possui um coeficiente de correlação elevado, indicando que a função proposta descreve bem o comportamento dos resultados numéricos analisados. Alguns parâmetros dessa função foram mantidos constantes sendo: $a = 20$, $b = 0.5$, $d = 0.8$ e $e = -0.3333$. O objetivo principal é tornar essa expressão o mais próximo possível da equação apresentada na tabela 4.8. A principal diferença é o expoente do termo que descreve o comportamento da área tomada pelas partículas, como pode ser observado na figura 4.22. O termo c , ficou livre para o processo de *fitting*, pois foi o que mais impactou no valor do r-quadrado quando comparado aos outros termos.

Figura 4.22 – Gráfico do termo γ que representa a área tomada pelas partículas.



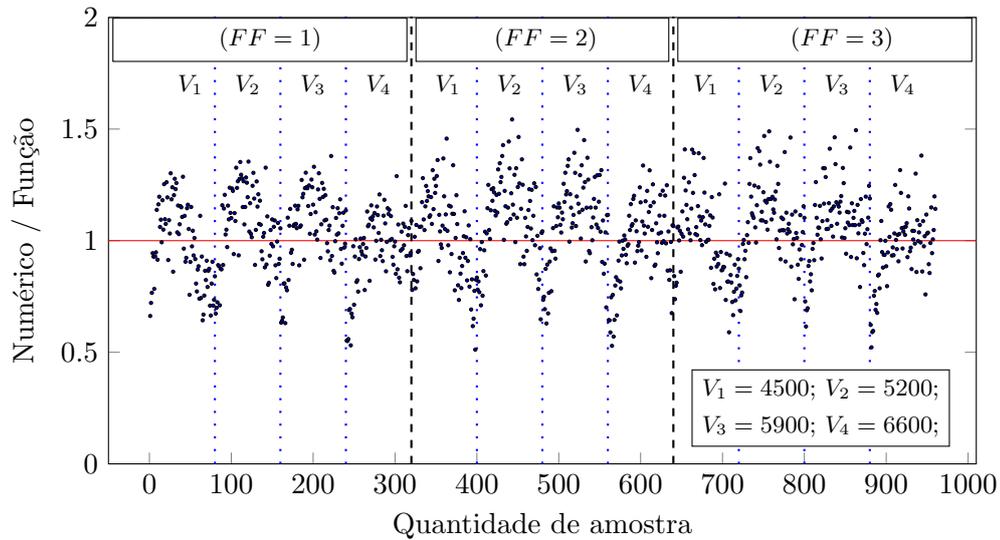
Fonte: Autor.

A figura 4.22, apresenta o impacto do expoente c na função que se propõe a estimar os valores dos CV das velocidades. Percebe-se que para pequenas proporções de área tomada pelas partículas no contínuo a função exibe valores elevados para a função do CV. Nesse cenário, pode se dizer que quando há poucas partículas no entanto, de grandes dimensões, elas podem ser interceptadas pelas linhas de medições provocando grandes variações nas medidas de velocidades e consequentemente no CV. Já para maiores proporções de área, a função do CV tende a apresentar um comportamento mais estável, o que pode se entendido como um meio mais homogêneo.

A partir da equação determinada no processo de *fitting* foram gerados os gráficos 4.23 e 4.24 onde são apresentadas as razões entre os resultados das simulações numéricas e os valores obtidos das expressões apresentadas nas tabelas 4.8 e 4.9. Em ambos os gráficos, as linhas pretas correspondem aos diferentes FF que foram utilizados nas simulações, sendo 1, 2 e 3

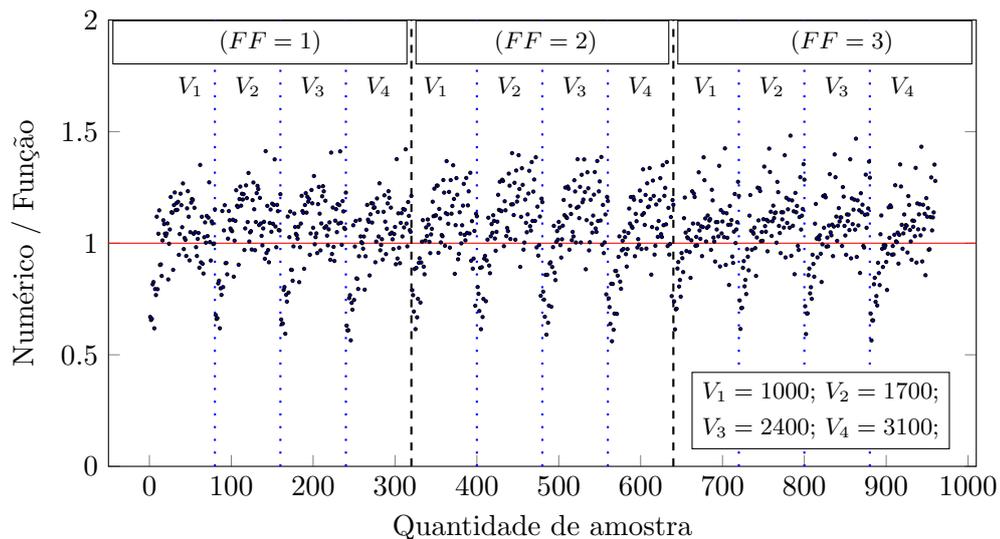
respectivamente. Já as linhas pontilhadas azuis limitam as razão entre as velocidades onde são mostrada os valores de 0.73, 0.55, 0.36 e 0.18, para as velocidades superiores a do contínuo e de 2.8, 1.24, 0.58 e 0.23 para as velocidades inferiores. Os resultados foram obtidos a partir do tratamento de 960 simulações.

Figura 4.23 – Gráfico da razão entre os valores do CV do numéricos e da função proposta, para a V_{cont} maior que a V_{part} .



Fonte: Autor.

Figura 4.24 – Gráfico da razão entre os valores do CV do numéricos e da função proposta, para a V_{part} menor que a V_{cont} .



Fonte: Autor.

Como pode ser observado nos gráficos 4.23 e 4.24, os valores da razão entre os dados numéricos e o da função têm um comportamento cíclico para todos os diâmetros, proporção de área, razão entre as velocidades e fator de forma das partículas. Pode ser observado, para baixas proporções de áreas, os valores das razões são menores que 1. Isso se deve aos altos valores

da função do CV para baixar proporções, como pode ser observado nos gráficos 4.22 e 4.21 (a) ($a=0.08728$), resultando em razões menores. À medida que a área tomada pelas partículas aumenta ocorre uma tendência dos valores da função se aproximarem do numérico. No entanto, ainda ocorre uma oscilação em torno de 1 ± 0.5 , o que pode ser atribuído à aleatoriedade das partículas no contínuo.

De posse de todos os resultados obtidos até o momento, foi realizado o teste de Kolmogorov-Smirnov, na qual foi possível verificar a normalidade dos dados obtidos. Dessa forma, as expressões estudadas até o momento podem ser apresentadas por meio de dois termos, I e II, como pode ser visto na expressão 4.9.

$$\underbrace{V_{prop} = \frac{V_{cont}V_{part}}{(1-\alpha)V_{part} + \alpha V_{cont}}}_I \qquad \underbrace{CV = f(\beta, \gamma, \eta, \nu)}_{II} \qquad (4.9)$$

O termo I da expressão, representa a estimativa da velocidade do pulso ultrassônico no concreto considerando as simplificações adotadas nas simulações. Já o termo II tem como objetivo apontar o coeficiente de variação (CV) da velocidade dada as principais características dos agregados graúdos que compõem o concreto. Como foi verificado a normalidade dos dados, é possível dizer que as funções propostas podem descrever bem o comportamento das medidas de velocidades além dos limites superior e inferior.

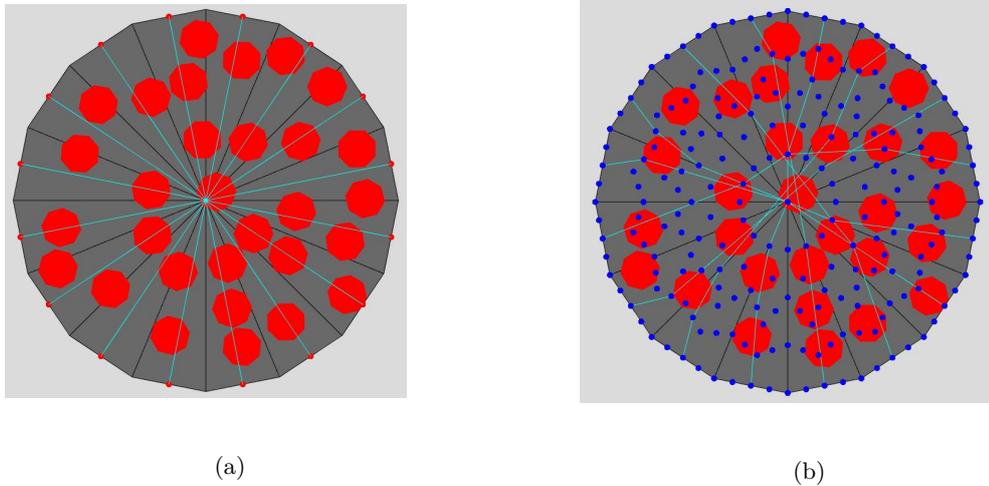
As análises dos itens 4.4 e 4.5 têm como propósito complementar as expressões já expostas, para isso serão estudadas a influências das trajetórias não retilíneas e contínuos compostos por partículas com diferentes diâmetros.

4.4 Análise 4 - Trajetórias não retilíneas

Determinar o exato caminho percorrido pelo pulso ultrassônico no concreto é tarefa árdua e incerta. No entanto, por simplificação, considera-se a trajetória percorrida pelo pulso como retilínea definida a partir da distância entre os transdutores e, por meio do tempo de propagação do pulso obtido durante o ensaio, determinam-se as medidas de velocidades.

Partindo da ideia que a trajetória pode não ser retilínea, iniciou-se um estudo que busca determinar as possíveis trajetórias não retilíneas percorridas pelos pulsos ultrassônicos. Para isso, são necessários utilizar algoritmos de otimização, que tem como propósito comparar as possíveis soluções até determinar a solução ótima, ou a mais satisfatória. Dentre os algoritmos disponíveis, foi adotado o algoritmo de Dijkstra. Esse método é determinístico, ou seja, dada uma certa entrada de valores sempre irá produzir a mesma saída, tendo como objetivo determinar o caminho de menor custo. Na presente aplicação, não será determinada a trajetória de menor custo, mas a de menor tempo de propagação, podendo ou não percorrer caminhos retilíneos. Na figura 4.25, é apresentado um exemplo em que as trajetórias retilíneas foram modificadas resultando na trajetória de menor tempo de propagação.

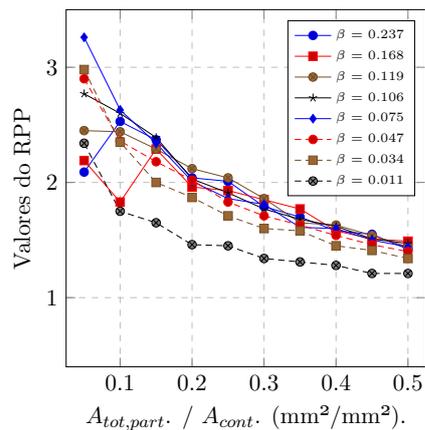
Figura 4.25 – Contínuo de 250 mm com partículas de 26.00 mm (a) trajetórias retilíneas e (b) trajetórias não retilíneas.



Fonte: Autor.

Como pode ser observado na figura 4.25 (b), existem pontos azuis que são utilizados como nós que definem os possíveis caminhos que o pulso pode percorrer. No entanto, para se aproximar de um comportamento real é necessário um número alto de nós auxiliares, o que pode tornar a simulação inviável. Assim, foram utilizados 224 nós nas simulações numéricas e o algoritmo de Dijkstra que, por sua vez, retornou os valores dos menores tempos de propagação dos pulsos percorrendo os caminhos não retilíneos. Esse resultado também é confirmado na figura 4.26, onde os valores do RPP tendem a ser superiores a 1, isso demonstra que as trajetórias não retilíneas estão passando por regiões de maiores velocidades, ou seja, por regiões que têm elevadas quantidades de partículas.

Figura 4.26 – Comportamento do RPP para trajetórias não retilíneas.

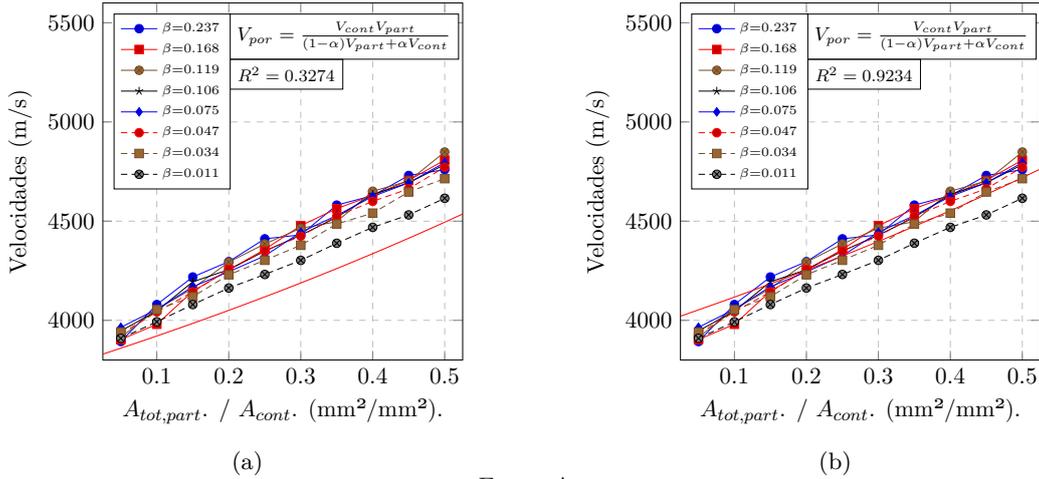


Fonte: Autor.

As Figuras 4.27 (a) e (b) apresentam os valores médios das velocidades obtidas por meio das simulações numéricas. Na primeira parte da figura 4.27 (a), os resultados obtidos nas simulações numéricas são maiores que os valores da curva proposta na qual descreve a velocidade do pulso em função da área das partículas. Diante os resultados da figura 4.26, esse dado já

era esperado, pois, as trajetórias não retilíneas passaram pelos caminhos de menores tempos de propagação. Para que o traçado da curva de velocidade se aproximasse dos resultados numéricos foi necessário multiplicar a função por um fator de majoração $\psi = 1.05$, como apresentado na Equação 4.10. O resultado pode ser visto na segunda parte da figura 4.27 (b), onde o valor do r-quadrado é de 0.9234, superior ao 0.3274 do primeiro caso.

Figura 4.27 – Comportamento da V_{prop} para a trajetórias não retilínea (a) e os valores corrigidos (b).



Fonte: Autor.

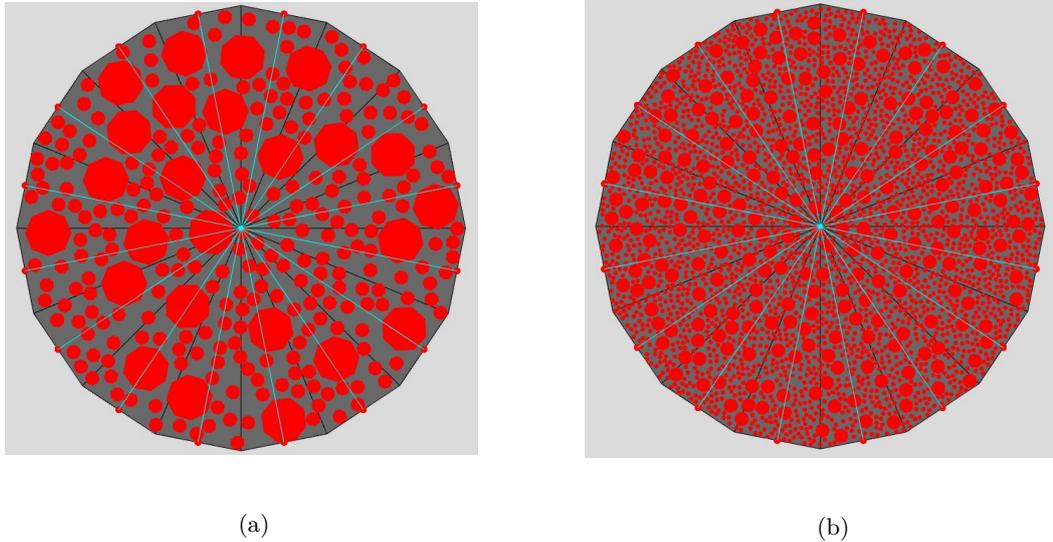
$$V_{prop} = \psi \left(\frac{V_{cont}V_{part}}{(1-\alpha)V_{part} + \alpha V_{cont}} \right) \quad (4.10)$$

O fator $\psi = 1.05$, adotado para o ajuste da função, pode ser entendido como adaptação quando se admite que o pulso ultrassônico viaja por regiões de maiores velocidades, diminuindo o seu tempo de propagação. No que diz respeito ao desvio padrão das velocidades, esses valores podem ser obtidos a partir do resultado da Equação 4.10 multiplicado pelo CV das velocidades dado pela função 4.9.

4.5 Análise 5 - Múltiplas partículas

Sabe-se que o concreto é composto por agregados com diferentes tamanhos. Buscando representar essa característica foi analisada a influência de partículas com diferentes diâmetros nos resultados do RPP e nos valores das velocidades obtidos por meio das simulações numéricas. O modelo adotado consiste em compor o contínuo com 50% da sua área tomada por partículas. Sendo que, dessa proporção de área foram geradas partículas com dois diâmetros distintos, correspondendo a 25% de cada. Na figura 4.28 (a) e (b), são apresentados dois contínuos com partículas de diâmetros distintos.

Figura 4.28 – Contínuo de 250 mm com partículas de 26.00 e de 11.63 mm em (a) e de 11.63 e 2.60 mm em (b).



Fonte: Autor.

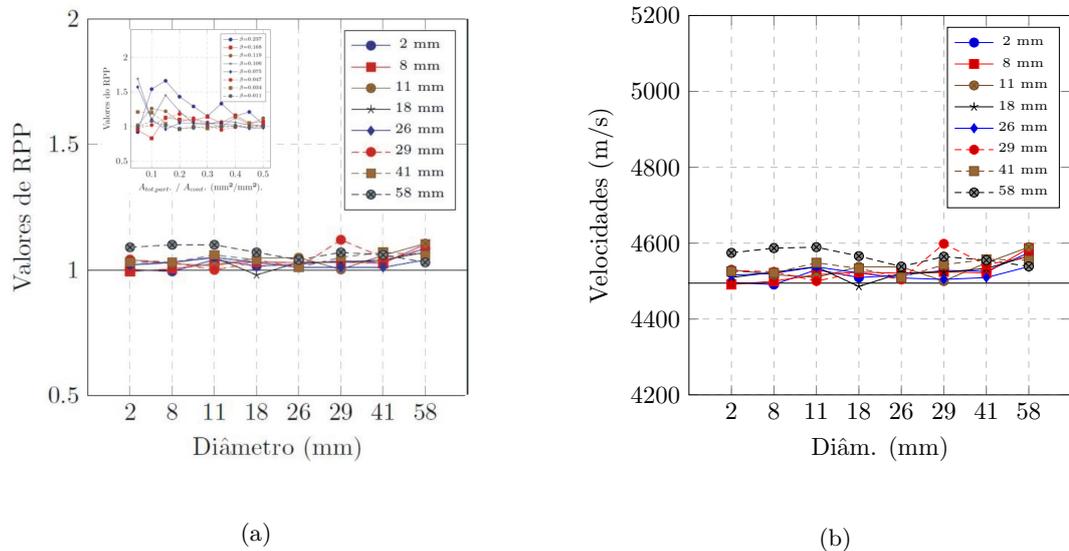
A partir desse modelo foi investigada a influência de diferentes diâmetros nas medidas dos CV das velocidades, pois o segundo termo da Equação 4.9 - Equação do CV - foi construído adotando-se partículas da mesma dimensão. Em termos práticos, o concreto é composto por agregados que seguem uma dada curva granulométrica possuindo partículas de diferentes tamanhos. Assim, foram analisadas duas equações, 4.11 e 4.12, que tem como finalidade descrever o comportamento variável β - razão entre os diâmetros - buscando uma aplicação prática. A equação 4.11, visou o cálculo do CV das velocidades por meio das aberturas das peneiras usadas na determinação da curva granulométrica. Desse modo, foi feito o somatório de cada diâmetro multiplicado pela sua correspondente proporção de massa retida na peneira e, posteriormente dividida pelo diâmetro do contínuo. Já a Equação 4.12, tem como finalidade o cálculo do CV por meio da média ponderada dos CV obtidos para cada diâmetro isoladamente.

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n D_i P_i}{D_{cont}} \quad (4.11)$$

$$CV = \sum_{i=1}^n CV_i \cdot P_i \quad (4.12)$$

Os resultados dos valores do RPP e das medidas de velocidades para o contínuo com partículas de diferentes diâmetros são apresentados na figura 4.29 (a) e (b), em que a velocidade do contínuo é de 3800 m/s e a das partículas são de 5500 m/s.

Figura 4.29 – Contínuo de 250 mm com duas partículas de diâmetros distintos em (a) valores de RPP e em (b) as velocidades.

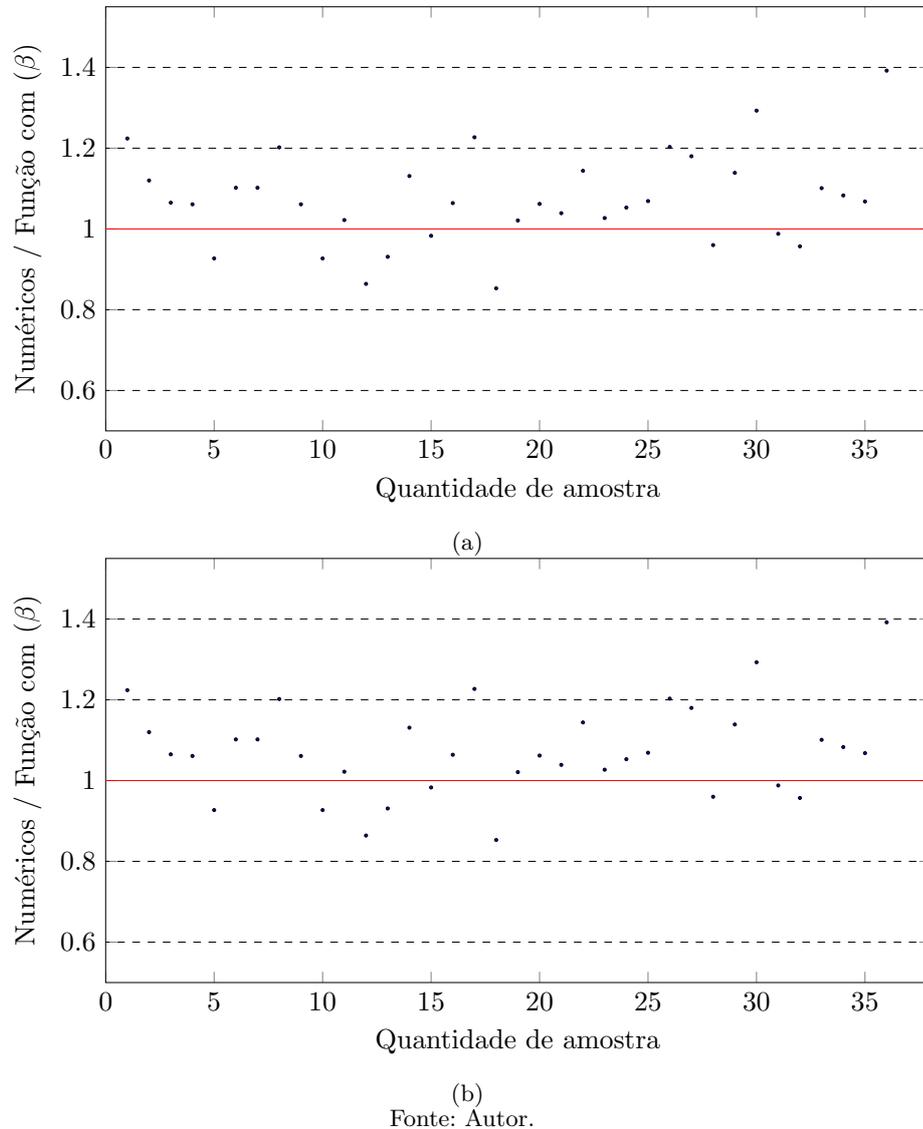


Fonte: Autor.

Na figura 4.29 é possível observar que os valores do RPP e das velocidades possuem um comportamento bem mais estável em torno dos valores previstos. Na parte da figura 4.29 (a), os valores de RPP estão próximos do 1, para todas as simulações realizadas. É possível observar na parte superior da figura 4.29 (a), que os valores de RPP encontrados na análise das partículas com a mesma dimensão apresentam-se mais dispersas. Os valores de RPP próximo de 1, indicam que a distância percorrida pelo pulso nas partículas se aproxima da área tomada pelas partículas. Resultando em valores de velocidades menos variável, próximo de 4494.62 m/s, sendo esse valor calculado a partir das equações V_{prop} . Os resultados são representados na figura 4.29 (b).

Os valores dos CVs das velocidades foram calculados e comparados com os resultados obtidos por meio da expressão do CV apresentado na tabela (4.8). Nesse sentido, a variável β foi substituída pelas equações 4.11 e 4.12, como pode ser observado na figura 4.30. No primeiro caso, parte (a) da figura 4.30, em que os valores foram obtidos por meio da Equação 4.11 foi possível verificar os melhores resultados, pois os pontos estão mais próximos de 1, indicando que a razão entre os resultados alcançados por meio da simulação e da equação do CV estão próximos. No segundo caso, parte (b) da figura 4.30, obtida por meio da média ponderada dos CV apresentaram os resultados mais dispersos. Esse último método pode não ser tão eficiente na previsão dos CV quando o contínuo possui partículas com diâmetros distintos.

Figura 4.30 – Razão entre resultado numérico e a função CV obtido em: (a) por β e em (b) por CV.



A obtenção dos CV das velocidades, a partir da substituição da variável β pela Equação 4.11 demonstrou uma relação direta de como as partículas do contínuo podem impactar nos valores das velocidades. Nesse sentido, a expressão 4.11 se aproximou de um modelo real, pois a presença dos agregados no concreto causa o espalhamento das ondas mecânicas, gerando interferências destrutivas ou construtivas que, por sua vez, afetam as medidas das velocidades, resultando em valores mais dispersos em torno da média.

4.6 Análise 6 - Discussão com resultados experimentais

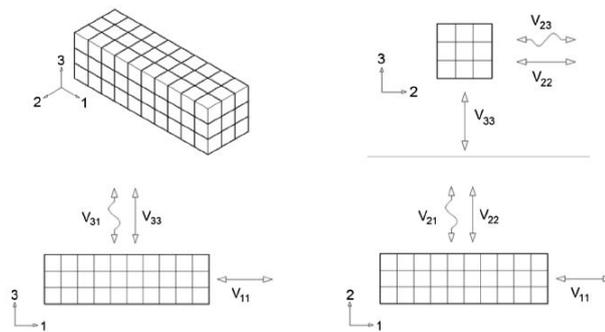
A partir das equações montadas ao longo desta pesquisa, buscou-se correlacionar com os resultados experimentais obtidos no estudo de Haach *et al.* (2021). Nesse trabalho, os autores investigaram a anisotropia do concreto por meio das medidas das velocidades do pulso ultrassônico. Os corpos de prova foram concretados em duas direções distintas, na vertical e na horizontal, utilizando três traços de concreto: pobre, médio e rico. Após a confecção dos corpos de prova foram

realizadas as medidas de velocidades na qual foi possível verificar que a direção da concretagem influencia no comportamento mecânico do concreto.

Por meio do traço do concreto e das massas específicas de cada componente fornecidos no trabalho em questão foi possível calcular a fração volumétrica dos agregados graúdos. A partir do valor da fração obtido e da curva granulométrica, determinou-se a quantidade de partícula a ser gerada na seção transversal do contínuo. Esse procedimento foi realizado para os traços pobre, médio e rico. A etapa de geração das partículas foi realizada de maneira automatizada por meio da implementação feita no software *TUSom* que conta com uma nova interface desenvolvida para o programa (figura 3.3).

No que diz respeito aos valores das velocidades dos pulsos ultrassônicos obtidos no estudo de Haach *et al.* (2021) foram selecionadas aquelas em que a direção de propagação e de polarização são as mesmas, sendo elas: V_{22} e V_{33} , de acordo com a figura 4.31. As velocidades na direção V_{11} não foram consideradas, pois, o caminho percorrido pelo pulso é maior e impacta na variável β do CV. No artigo em questão, não foi informado o valor da velocidade da onda mecânica no agregado graúdo utilizado na produção do concreto. É citado apenas a origem mineralógica da rocha, o basalto. Assim, a velocidade foi estimada com base na tabela 2.3, sendo considerada igual a 5175 m/s. Os resultados experimentais das velocidades e dos CV são apresentados na tabela 4.10.

Figura 4.31 – Direções de propagação e polarização das ondas ultrassônicas.



Fonte: Haach *et al.* (2021).

Tabela 4.10 – Resultados experimentais de Haach *et al.* (2021) .

Concretagem	Vertical			Horizontal		
	Pobre	Médio	Rico	Pobre	Médio	Rico
V_{conc}	4901.03	4898.53	5016.09	5037.37	5149.28	5046.77
CV(%)	3.43	1.60	2.44	2.33	1.33	2.82

A partir dos dados apresentados na tabela 4.10, foram calculados os valores para os pulsos nas argamassas, assim como os desvios-padrão e CV das velocidades para cada traço de concreto. Todos esses dados foram determinados pelas equações da V_{prop} e do CV desenvolvida nesta pesquisa (Equação 4.8), na qual foi considerada que a velocidade do agregado é maior que a

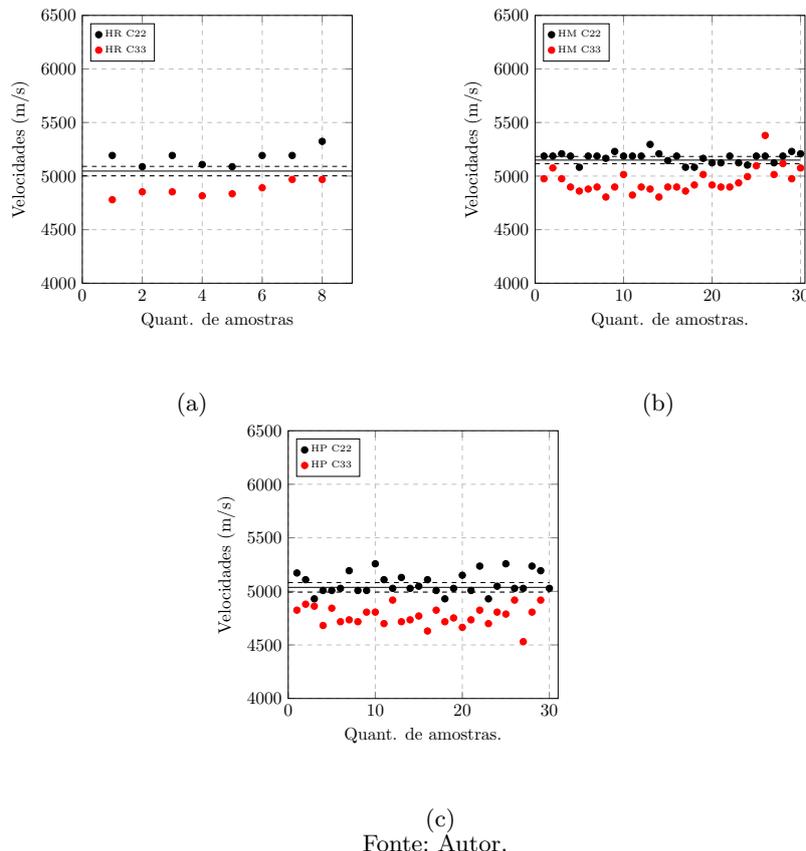
da argamassa. As velocidades dos concretos para cada traço, obtidas no programa experimental, foram divididas por 1.05, pois a equação utilizada para calcular o CV considera que as trajetórias são retilíneas. O fator de forma (FF) das partículas foi adotado igual a 1.5 e, para o cálculo da razão entre os diâmetros foi utilizado o valor de $\beta = (\sum D_{part} P_i) / D_{cont}$ obtida na análise do contínuo com diferentes diâmetros. Nesse caso, buscou-se uma aproximação com o modelo real na qual, o concreto é composto por agregados de diferentes diâmetros, sendo representada pela sua curva granulométrica. Os resultados podem ser observados na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultados numéricos estimados.

Concretagem	Vertical			Horizontal		
Traço	Pobre	Médio	Rico	Pobre	Médio	Rico
Veloc. arga. (m/s)	4396.45	4395.17	4550.58	4586.95	4748.97	4594.42
Desv. Padrão	56.36	56.33	46.65	44.83	33.99	43.91
CV (%)	1.15	1.15	0.93	0.89	0.66	0.88

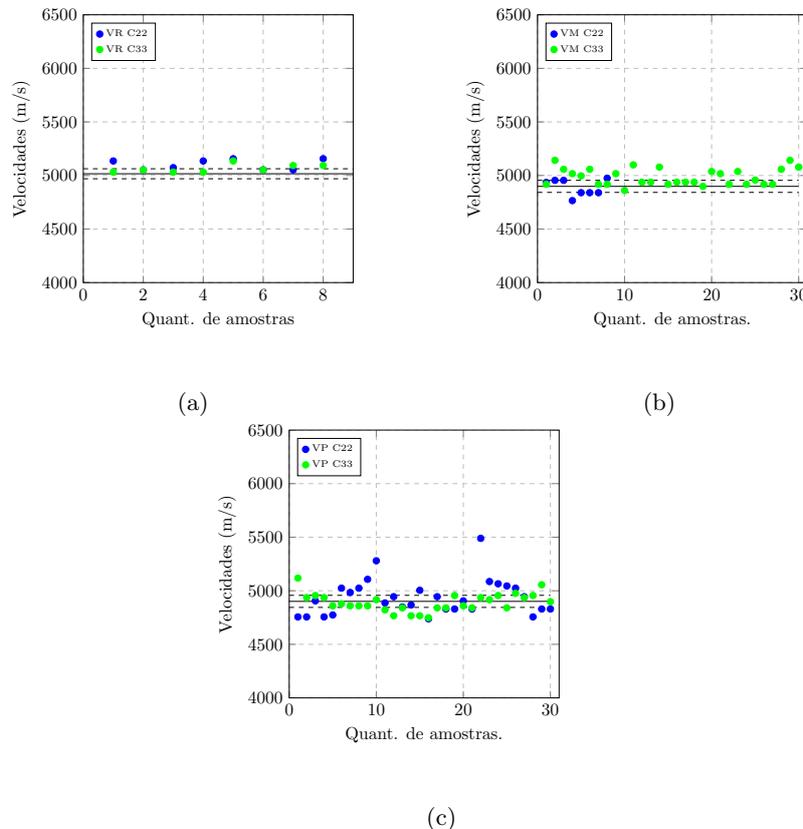
A partir dessas considerações, foram geradas as Figuras 4.32 e 4.33, (a), (b) e (c), em que é possível verificar que alguns resultados experimentais estão fora dos limites estimados pelas equações desenvolvidas nesta pesquisa. O valores para a velocidade foi determinada pelas expressões da V_{prop} e, os limites calculados a partir do coeficiente de variação (CV), representadas pelas equações 4.3 e 4.8, respectivamente.

Figura 4.32 – Velocidades para os traços de concreto (a) rico, (b) médio e (c) pobre, moldado na horizontal.



Fonte: Autor.

Figura 4.33 – Velocidades para os traços de concreto (a) rico, (b) médio e (c) pobre, moldado na vertical.



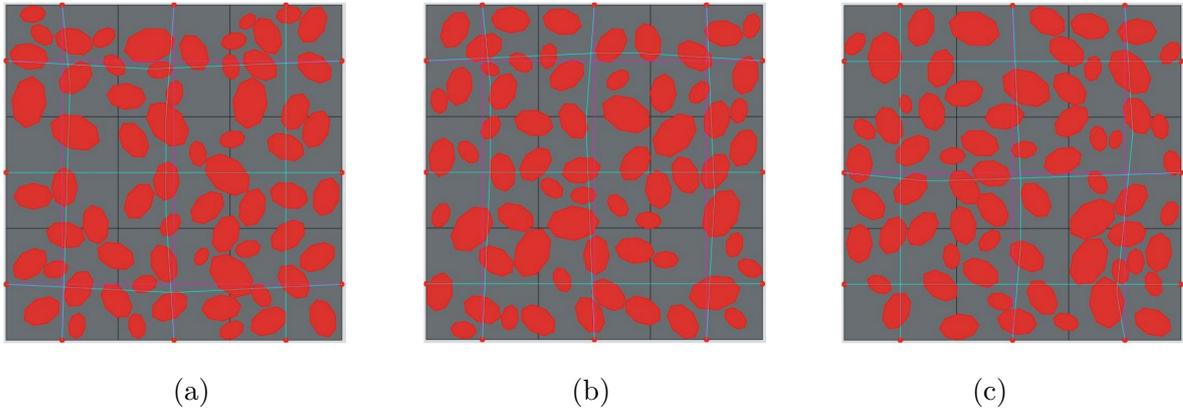
Fonte: Autor.

A aplicabilidade das equações desenvolvidas neste trabalho apresentaram-se promissoras. No entanto, vale destacar a necessidade em realizar um programa experimental com um olhar mais atento às propriedades físicas dos agregados graúdos que são utilizadas como variáveis nas equações. Visto que, alguns dados usados nas expressões foram estimadas a partir de valores médios, como é o caso da velocidade da argamassa. Obtida por meio da velocidade do concreto. Desta forma, erros intrínsecos podem ter sido acumulados. No caso das medidas experimentais esses dados poderiam apresentar resultados mais confiáveis e precisos. A velocidade da rocha é outro parâmetro que precisa ser determinado com maior precisão para que a expressão seja mais representativa. Sabe-se que na literatura a velocidade da rocha basalto tem uma faixa de variação relevante. Apesar disso, é de se esperar que para a mesma jazida a variação da velocidade seja menor. Assim, a determinação do valor da onda mecânica na rocha tem impacto importante na avaliação dos resultados da velocidade no concreto. O fator de forma (FF) das partículas também é outro parâmetro que deveria ser determinado com precisão, pois o valor utilizado também foi estimado.

Visando correlacionar os resultados experimentais com resultado numéricos, foram mantidas as mesmas características dos concretos desenvolvidos no trabalho de Haach *et al.* (2021) para a realização das simulações numéricas. Foi utilizado o software TUSom e, a partir da implementação desenvolvida nesta pesquisa foi possível distribuir as partículas na seção transversal do contínuo, seguindo a curva granulométrica do modelo experimental como pode ser observado nas

Figuras 4.34 (a), (b) e (c). As trajetórias dos pulsos ultrassônicos foram atualizadas tendo como base o algoritmo de Dijkstra e, desta forma, foi determinado o menor tempo de propagação do pulso.

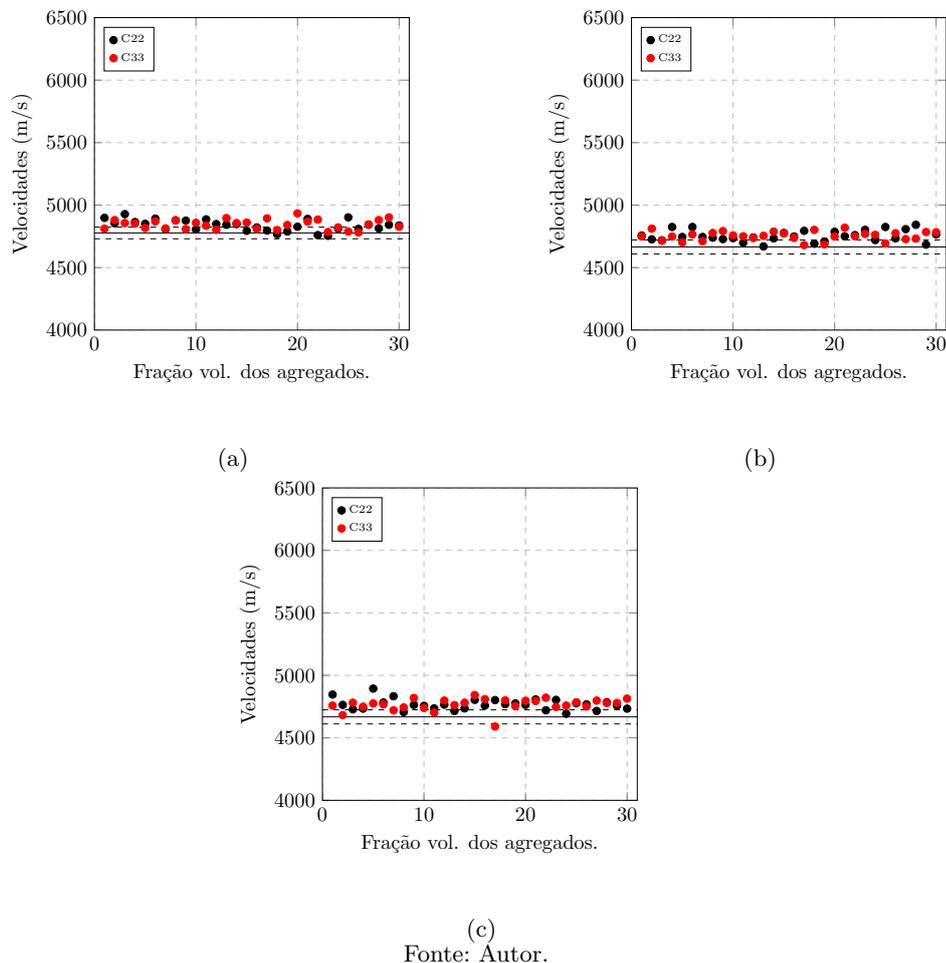
Figura 4.34 – Seção transversal do concreto: traço (a) rico, (b) médio e (c) pobre.



Fonte: Autor.

Definidos os modelos, foram obtidas as medidas de velocidades nos concretos para cada traço, como pode ser observado na figura 4.35.

Figura 4.35 – Resultados numéricos da velocidades considerando os traços de concreto (a) rico, (b) médio e (c) pobre.



As medidas de velocidades obtidas por meio das simulações numéricas (fig. 4.35) estão próximas dos valores das velocidades estimados através da equação da V_{prop} e fora do limite superior e inferior estimados pela equação do CV. Isso se deve ao fato que nas simulações numéricas foi adotado o algoritmo de otimização para determinar as trajetórias de menor tempo. No entanto, para o cálculo das velocidades foi utilizado a menor distância, ou seja, a reta que une os dois pontos. Como no desenvolvimento das equações não foi considerada as trajetórias não retilíneas, as medidas de velocidades obtidas por meio de simulações numéricas estão mais dispersas dos valores estimados. No caso da figura 4.35 (c) os valores da simulação numérica foram superiores ao valor da velocidade estimada pela equação da V_{prop} . Esse comportamento já era esperado, uma vez que nas simulações numéricas, não foram consideradas as perdas de energia do pulso ultrassônico e nem os efeitos de interferências construtivas e destrutivas das ondas mecânicas oriundas da refração e da reflexão. Esses fenômenos, que ocorrem no modelo experimental, impactam nas medidas de velocidades fazendo com que os dados fiquem mais dispersos - figura 4.32 e 4.33.

As propriedades do concreto obtidas do estudo de Haach *et al.* (2021), foram suficientes para a aplicação das equações desenvolvidas neste trabalho. No entanto, para melhorar a aplicabilidade das expressões, seria necessário confeccionar novos corpos de prova com um olhar

atento às principais propriedades físicas do agregado, principalmente as que são usadas como variáveis nas expressões desenvolvidas de V_{prop} e do coeficiente de variação das velocidades (CV). A elaboração e a execução do plano experimental deste trabalho não foi possível devido à pandemia do Covid-19. No entanto, a aplicação das equações desenvolvidas apresentaram-se promissoras na análise da heterogeneidade do concreto por meio das variações das velocidades dos pulsos ultrassônicos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, serão apresentadas as principais conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, apontando os principais aspectos de cada análise e seus objetivos alcançados. A partir dessa abordagem, o capítulo é finalizado com recomendações para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo avaliar por meio de simulações numéricas o efeito da heterogeneidade do concreto na variação da velocidade do pulso ultrassônico.

A metodologia adotada neste trabalho consiste em simulações numéricas de propagação de ondas mecânicas em meio contínuo. Para isso, foi utilizado o software TUSom, na qual foi possível determinar as medidas de tempo a partir de um mapa de velocidades definido. As trajetórias dos pulsos foram adotadas como retilíneas em boa parte das análises e a heterogeneidade do concreto foi representada pela presença de partículas no contínuo. Nesse sentido, um código computacional foi desenvolvido tornando possível a distribuição de partículas no contínuo de maneira automatizada seguindo uma determinada curva granulométrica pré-definida. A partir disso, foram apresentados e discutidos os modelos estudados nesta pesquisa tendo como foco principal as principais propriedades do agregado graúdo e suas influências, nos valores dos coeficientes de variação (CV) e nas medidas de velocidades.

No primeiro modelo, foi investigada a influência da razão entre a dimensão da partícula e o percurso realizado pelo pulso ultrassônico. Nessa etapa, foi possível verificar que, quanto menor é o valor dessas razões, menores são os valores dos coeficientes de variação (CV) das velocidades, indicando que as medidas de velocidades das simulações numéricas estão mais próximas do valor médio. Também foi verificado que as medidas de velocidade seguem uma distribuição normal, tendo como critério de análise o teste de normalidade Teste Kolmogorov-Smirnov. O estudo ainda se propôs a avaliar o impacto da proporção de área tomada pelas partículas nas medidas de velocidades e, a partir desse comportamento, foi desenvolvida uma expressão permitiu estimar a velocidade do pulso em função da área total das partículas presente no contínuo.

Dentre os resultados analisados, observou-se que a diferença entre as velocidades das partículas e do contínuo teve impacto relevante nas medidas de velocidades. No primeiro momento, em que todos os resultados obtidos nessa análise foram utilizados para realizar o *fitting* com um única equação o valor de R^2 determinado não foi considerado satisfatório. Desse modo, foi necessário realizar dois *fittings* distintos para os resultados obtidos. O primeiro, considerou o cenário em que as velocidades das partículas são superiores ao do contínuo e outro em que as velocidades das partículas são inferiores. Os resultados apontaram que essa estratégia foi bem sucedida, pois as equações descreveram bem o comportamento das velocidades em ambos os casos.

O fator de forma (FF) das partículas também foi simulado. Verificou-se que, a medida que o FF aumentam, os valores do CV das velocidades diminuem pois é necessário maiores quantidades de partículas para atender as mesmas proporções de áreas analisadas, o que implica também num contínuo mais homogêneo, ou seja, com partículas distribuídas de maneira regular no contínuo. Após essa conclusão, o FF foi implementado como variável na equação que buscou descrever o comportamento do CV das velocidades.

Buscando se aproximar do modelo real, foram investigadas as medidas de velocidades quando o pulso realiza trajetórias não retilíneas. Constatou-se que é necessário um fator de majoração para que as medidas das velocidades obtidas na expressão V_{prop} se ajustem aos valores encontrados nas simulações numéricas, pois as medidas obtidas foram superiores às previstas. Visto que o algoritmo de Dijkstra reduziu o tempo de propagação, modificando as trajetórias dos pulsos, passando por regiões de maiores velocidades.

O modelo com múltiplas partículas de diâmetros distintos também foi simulado, pois, em termos práticos, os agregados graúdos possuem diferentes tamanhos, representado de maneira evidente por meio da sua curva granulométrica. Notou-se que, o produto dos diâmetros das partículas pelas suas respectivas massas retidas nas peneiras dividida pelo diâmetro do contínuo resultou nas menores variações das velocidades. Desta forma, essa estratégia utilizada se apresentou como a mais adequada para descrever os resultados do modelo numérico composto por partículas com dimensões distintas, como pode ser observado na Figura 4.30 (b).

Por fim, através das equações desenvolvidas neste trabalho para determinar a velocidade do pulso e o CV, foi feita a comparação com estudo experimental na qual, foi possível verificar que as equações propostas apresentaram resultados promissores na estimativa das velocidades e nas suas respectivas variações. No entanto, ainda é necessário realizar um estudo experimental com um olhar mais atento para as informações que são utilizadas como variáveis nas equações da velocidade e do coeficiente de variação (CV). Buscando, desta forma, obter coeficiente que permitam melhorar as interpretações da avaliação da heterogeneidade do concreto por meio do ensaio de pulso ultrassônico.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

De posse das discussões realizadas neste trabalho, são apresentadas as principais sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar um estudo do ensaio da propagação do pulso ultrassônico por meio da análise da amplitude do pulso. Esse estudo consiste na investigação do decaimento da energia do pulso através da perda de amplitude. A implementação numérica pode ser feita através da redução de um porcentagem do valor inicial e, a medida que a trajetória do pulso passa pelos agregados a amplitude é reduzida. Assim, para considerar esse decaimento pode utilizar um expressão similar a de juros composto, como apresentado na Equação 5.1.

$$A = A_0(1 - p)^n \quad (5.1)$$

- Elaboração de estudo experimental visando correlacionar com as equações obtidas neste trabalho. Buscando realizar os ensaios atento às medidas dos pulsos ultrassônicos com foco nas principais características dos agregados graúdos.
- Realizar um estudo da variação da velocidade do pulso ultrassônico por meio de uma abordagem 3D utilizando o *software* TUSom.

REFERÊNCIAS

- ABO-QUDAIS, S. A. Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. **Construction and building materials**, Elsevier, v. 19, n. 4, p. 257–263, 2005.
- AGGELIS, D. *et al.* Numerical simulation of elastic waves for visualization of defects. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 25, n. 4, p. 1503–1512, 2011.
- AGGELIS, D. G.; SHIOTANI, T. Experimental study of surface wave propagation in strongly heterogeneous media. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 122, n. 5, p. EL151–EL157, 2007.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI-228.2R**: Report on nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures. Farmington Hills, 2013. 86 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597**: Standard test method for pulse velocity through concrete. Pennsylvania, United States, 2009. 4 p.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos e Inspeção - ABENDI, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7809**: Agregado graúdo — determinação do índice de forma pelo método do paquímetro — método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019. 7 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019. 15 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto – requisitos. Rio de Janeiro, 2022. 8 p.
- BERTOLDO, C.; GORSKI, R. K. S.; GONÇALVES, R. Evaluation of elastic anisotropy of concrete using ultrasound wave propagation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 32, n. 4, p. 9, 2020.
- BOMPAN, K. F.; HAACH, V. G. Ultrasonic tests in the evaluation of the stress level in concrete prisms based on the acoustoelasticity. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 162, p. 740–750, 2018.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 12504 : Part 4**: Determination of ultrasonic pulse velocity. London, 2004. 18 p.
- BUNGEY, J. The validity of ultrasonic pulse velocity testing of in-place concrete strength. **NDT & International**, p. 296–300, 1980.

- BUNGEY, J.; MILLARD, S.; GRANTHAM, M. **Testing of Concrete in Structures**. 4^a. ed. London: Taylor & Francis e-Library, 2006.
- CAWFORD, G. **Guide to Nondestructive Testing of Concrete**. Washington: Federal Highway Administration, 1997. 68 p.
- CONSTANTINIDES, G.; ULM, F.-J. The effect of two types of c-s-h on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 67–80, 2004.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische mathematik**, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.
- DÉROBERT, X.; AUBAGNAC, C.; ABRAHAM, O. Comparison of ndt techniques on a post-tensioned beam before its autopsy. **NDT & E International**, Elsevier, v. 35, n. 8, p. 541–548, 2002.
- FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados**. 1^a. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- HAACH, V. *et al.* Evaluation of elastic anisotropic relations for plain concrete using ultrasound and impact acoustic tests. **Journal of Materials in Civil Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 33, n. 2, 2021.
- HAACH, V. G.; RAMIREZ, F. C. Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 119, n. 6, p. 61–70, 2016.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física: Gravitação, ondas e termodinâmica**. 10^a. ed. Rio de Janeiro: [S.l.: s.n.], 2016. v. 2. Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi.
- HASHIN, Z.; SHTRIKMAN, S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, Elsevier, v. 11, n. 2, p. 127–140, 1963.
- HUGHES, D. S.; KELLY, J. Second-order elastic deformation of solids. **Physical review**, APS, v. 92, n. 5, p. 1145, 1953.
- IKPONG, A. The relationship between the strength and non-destructive parameters of rice husk ash concrete. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 23, n. 2, p. 387–398, 1993.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **IAEA**: Training course serie 17. Pennsylvania, United States, 2002.
- JONES, R.; FACAOARU. Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method. **Matériaux et constructions**, v. 2, n. 10, p. 275 – 284, 1969.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to geophysical exploration**. 3^a. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002.
- KIM, B.-C.; KIM, J.-Y. Characterization of ultrasonic properties of concrete. **Mechanics Research Communications**, Elsevier, v. 36, n. 2, p. 207–214, 2009.
- KOMLOS, K. *et al.* Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 18, n. 5, p. 357–364, 1996.
- KRAUTKRÄMER, J.; KRAUTKRÄMER, H. **Ultrasonic testing of materials**. 4. ed. [S.l.: s.n.]: Springer Science & Business Media, 1990.

- LILLAMAND, I. *et al.* Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading. **NDT & e International**, Elsevier, v. 43, n. 8, p. 655–660, 2010.
- LIN, Y.; LAI, C.-P.; YEN, T. Prediction of ultrasonic pulse velocity (upv) in concrete. **Materials Journal**, v. 100, n. 1, p. 21–28, 2003.
- MA, H.; XU, W.; LI, Y. Random aggregate model for mesoscopic structures and mechanical analysis of fully-graded concrete. **Computers & Structures**, Elsevier, v. 177, p. 103–113, 2016.
- MALHOTRA, V.; CARINO, N. **Nondestrutive Testing of Concrete**. 2^a. ed. West Conshohoken: Chemical Rubber Company Press, 2004.
- MCCANN, D.; FORDE, M. Review of ndt methods in the assessment of concrete and masonry structures. **Ndt & E International**, Elsevier, v. 34, n. 2, p. 71–84, 2001.
- METHA, P.; MONTEIRO, P. **Concrete: Microstruture, properties, and materials**. 3^a. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2014.
- MIER, J. G. V. **Fracture processes of concrete**. [S.l.: s.n.]: CRC press, 1996. v. 12.
- MURNAGHAN, F. D. Finite deformations of an elastic solid. **American Journal of Mathematics**, JSTOR, v. 59, n. 2, p. 235–260, 1937.
- NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 5^a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. Tradução de Ruy Alberto Cremonini.
- NILSEN, A. U.; MONTEIRO, P. J. Concrete: a three phase material. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 23, n. 1, p. 147–151, 1993.
- PERLIN, L. P. **Tomografia ultrassônico em concreto: desenvolvimento de uma ferramenta computacional**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- PHILIPPIDIS, T.; AGGELIS, D. Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 43, n. 7, p. 584–595, 2005.
- POPOVICS, J. Nde techniques for concrete and masonry structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, Wiley Online Library, v. 5, n. 2, p. 49–59, 2003.
- POPOVICS, S.; POPOVICS, J. Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete. **Materials and Structures**, v. 24, n. 7, p. 15–23, 1991.
- PRASSIANAKIS, I.; GIOKAS, P. Mechanical properties of old concrete using destructive and ultrasonic non-destructive testing methods. **Magazine of Concrete Research**, Thomas Telford Ltd, v. 55, n. 2, p. 171–176, 2003.
- PUNDIT. **Intruções operacionais: Instrumento ultrassônico pundit lab / pundit lab+**. [S.l.: s.n.]: Proceq SA, 2017. 32 p.
- PUNURAI, W. *et al.* Characterization of entrained air voids in cement paste with scattered ultrasound. **Ndt & E International**, Elsevier, v. 39, n. 6, p. 514–524, 2006.
- RAMANIRAKA, M. *et al.* Effect of the interfacial transition zone on ultrasonic wave attenuation and velocity in concrete. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 124, p. 105809, 2019.
- RAMÍREZ, F. C. **Detecção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) — Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP, São Carlos, 2015.

REUSS, A. Berechnung der fließgrenze von mischkristallen auf grund der plastizitätsbedingung für einkristalle . **Zamm-zeitschrift Fur Angewandte Mathematik Und Mechanik**, v. 9, p. 49–58, 1929.

SCHÖN, J. H. **Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics**. [*S.l.: s.n.*]: Elsevier, 2011. v. 8.

SHULL, P. J. **Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications**. [*S.l.: s.n.*]: CRC press, 2002.

TOPÇU İlker B.; BILIR, T.; BOĞA, A. R. Estimation of the modulus of elasticity of slag concrete by using composite material models. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 24, n. 5, p. 741–748, 2010.

TURGUT, P.; KUCUK, O. F. Comparative relationships of direct, indirect, and semi-direct ultrasonic pulse velocity measurements in concrete. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, v. 42, p. 745–751, 2006.

VERGARA, L. *et al.* Nde ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar. **NDT & e International**, Elsevier, v. 34, n. 8, p. 557–562, 2001.

VOIGT, W. Ueber die beziehung zwischen den beiden elasticitätsconstanten isotroper körper. **Annalen der Physik**, v. 274, n. 12, p. 573–587, 1889.

WYLLIE, M. R. J.; GREGORY, A. R.; GARDNER, L. W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. **Geophysics**, Society of Exploration Geophysicists, v. 21, n. 1, p. 41–70, 1956.

