

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

Avaliação ultrassônica de elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos na ausência e presença de tensões uniaxiais de compressão

José Anchiêta Damasceno Fernandes Neto

Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

JOSÉ ANCHIÊTA DAMASCENO FERNANDES NETO

Avaliação ultrassônica de elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos na ausência e presença de tensões uniaxiais de compressão

Versão Corrigida

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

Tese 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 obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Assoc. 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).

F363a	<p>Fernandes Neto, José Anchiêta Damasceno</p> <p>Avaliação ultrassônica em elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos na ausência e presença de tensões uniaxiais de compressão / José Anchiêta Damasceno Fernandes Neto; orientador Vladimir Guilherme Haach. São Carlos, 2023.</p> <p>Tese (Doutorado) - 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.</p> <p>1. Alvenaria estrutural. 2. Bloco cerâmico. 3. Ultrassom. 4. Acustoelasticidade. 5. Velocidade de pulso ultrassônico. 6. Ensaio não destrutivo. I. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **JOSÉ ANCHIÊTA DAMASCENO FERNANDES NETO.**

Título da tese: "Avaliação ultrassônica de elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos na ausência e presença de tensões uniaxiais de compressão".

Data da defesa: 07/07/2023.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado **Vladimir Guilherme Haach**

APROVADO

(Orientador)

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

Prof. Associado **Ricardo Carrazedo**

APROVADO

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

Prof. Dr. **Cláudius de Sousa Barbosa**

APROVADO

(Escola Politécnica - EP/USP)

Prof. Dra. **Cinthy Bertoldo Pedroso**

APROVADO

(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Dr. **Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita**

APROVADO

(Universidade Federal do Ceará/UFC)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):

Prof. Associado **Ricardo Carrazedo**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

À minha família, com amor,
admiração e gratidão pelo incansável
apoio ao longo deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de inspiração e perseverança nos momentos mais difíceis, pela serenidade, sabedoria e por sempre iluminar o meu caminho com fé e esperança.

À minha família, em especial aos meus Pais, Maria do Perpétuo e Raimundo Nonato, e ao meu irmão João, que apesar da distância sempre se mantiveram presentes, concedendo apoio e motivação durante o trabalho.

Ao Professor Vladimir G. Haach, pela orientação deste trabalho, paciência, prontidão e, sobretudo pelas sugestões, críticas, compromisso com a pesquisa e conhecimentos compartilhados.

Aos amigos do Departamento de Engenharia de Estruturas, em especial Danilo Pereira, Ray Calazans, Luan Reginato, Thomas Sombra, Herbert Lopes, Yury Ouriques, Alex Dantas, Lucas Antônio, Felipe Penazzo, Lucas Ribeiro, Rodrigo Nogueira e Humberto Lima pela amizade, pelo auxílio nesta pesquisa e pelos momentos de descontração que tornaram este período mais proveitoso.

Ao corpo técnico do Laboratório de Estruturas Prof. Dante Martinelli, pelas sugestões e suporte na realização dos ensaios experimentais.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas, que de maneira direta ou indireta contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos, em especial ao Departamento de Engenharia de Estruturas, pela disponibilização de infraestrutura, suporte técnico e contribuições de cunho pessoal e profissional ao longo desses anos.

À Cerâmica City e à Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) pelo fornecimento dos blocos cerâmicos necessários para realização deste trabalho.

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

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos”
Provérbios, 16:3

RESUMO

FERNANDES NETO, J. A. D. **Avaliação ultrassônica de elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos na ausência e presença de tensões uniaxiais de compressão**. 2023. 198p. Tese (Doutorado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Os ensaios ultrassônicos têm sido amplamente utilizados na caracterização e avaliação de estruturas e materiais, possibilitando a obtenção da velocidade de pulso ultrassônico nos materiais e também a sua avaliação quanto ao nível de tensão aplicada, com base na teoria da acustoelasticidade, que por sua vez é caracterizado pela variação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (VPU) em função da tensão aplicada. Entretanto, apesar da ampla utilização dos elementos estruturais em alvenaria, a avaliação destes mesmos através de ensaios não destrutivos ultrassônicos ainda é extremamente incipiente. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal realizar uma avaliação em elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos por meio de ensaios não destrutivos ultrassônicos. Para tal, realizou-se um amplo programa experimental no qual blocos cerâmicos e prismas de alvenaria estrutural foram caracterizados da forma tradicional e, posteriormente, submetidos aos ensaios ultrassônicos. Dessa forma, os elementos foram inicialmente avaliados no que diz respeito à caracterização dos mesmos através de ensaios ultrassônicos sem tensão e, em seguida, foram avaliados de forma não destrutiva simultaneamente à aplicação de um carregamento de compressão uniaxial. Finalmente, observou-se que os blocos cerâmicos apresentaram uma variação considerável na VPU entre as suas diferentes direções, se comportando de maneira transversalmente isotrópica e que a VPU dos prismas sofreu grande influência da atenuação das ondas na interface bloco-junta. Além disso, a observação do efeito acustoelástico foi realizada através de ondas longitudinais e transversais, que apontaram entre si uma maior ou menor sensibilidade ao efeito.

Palavras-chave: alvenaria estrutural; bloco cerâmico; ultrassom; acustoelasticidade; velocidade de pulso ultrassônico; ensaio não destrutivo.

ABSTRACT

FERNANDES NETO, J. A. D. **Ultrasonic evaluation of hollow clay blocks masonry elements in the absence and presence of uniaxial compressive stresses**. 2023. 198p. Thesis (PhD. in Civil Engineering (Structural Engineering)) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2023.

Ultrasonic testing has been widely employed in the characterization and evaluation of structures and materials, enabling the determination of ultrasonic pulse velocity (UPV) in materials and also their assessment regarding the applied stress level based on the theory of acoustoelasticity. Acoustoelasticity is characterized by the variation of ultrasonic wave propagation velocity as a function of applied stress. However, despite the extensive use of masonry elements, the evaluation of these elements through non-destructive ultrasonic testing is still extremely limited. In this context, the main objective of this study is to perform an assessment of hollow clay masonry elements using non-destructive ultrasonic testing. To achieve this, a comprehensive experimental program was performed, in which ceramic blocks and masonry prisms were characterized using conventional methods and subsequently subjected to ultrasonic testing. Thus, the elements were initially evaluated in terms of their characterization through ultrasonic testing without stress, and later non-destructively evaluated while simultaneously applying uniaxial compressive loading. Finally, it was observed that the ceramic blocks exhibited a considerable variation in UPV among their different directions, behaving in a transversely isotropic manner, and that the UPV of the prisms was greatly influenced by wave attenuation at the block-joint interface. Furthermore, the observation of acoustoelastic effect was performed through longitudinal and transverse waves, which exhibited varying degrees of sensitivity to the effect.

Keywords: masonry; clay block; ultrasound; acoustoelasticity; ultrasonic pulse velocity; non-destructive testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Edifícios em alvenaria estrutural com blocos cerâmicos	34
Figura 1.2 – Metodologia utilizada no trabalho	38
Figura 2.1 – Blocos cerâmicos estruturais com parede vazada, maciça e alveolar	42
Figura 2.2 – Tipos de ondas: (a) Ondas P ou longitudinais e (b) ondas S ou de cisalhamento	46
Figura 2.3 – Esquema de funcionamento do ensaio ultrassônico	46
Figura 2.4 – Tipos de arranjo dos transdutores: (a) transmissão direta, (b) transmissão semidireta e (c) transmissão indireta	47
Figura 2.5 – Orientação das velocidades propagadas e polarizadas	48
Figura 2.6 – Ensaio acustoelástico em corpo de prova de concreto	51
Figura 2.7 – Aplicação do ultrassom em parede de alvenaria	52
Figura 2.8 – Evolução do número de publicações sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria conforme a Scopus	54
Figura 2.9 – Histórico de países com publicações sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria	55
Figura 2.10 – Histórico de materiais empregados em publicações sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria	55
Figura 2.11 – Rede bibliométrica de dados sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria	56
Figura 2.12 – Evolução do número de publicações sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria sob tensão conforme a Scopus*	57
Figura 2.13 – Relação entre a resistência à compressão e a velocidade de pulso ultrassônico	59
Figura 2.14 – Realização de ensaios ultrassônicos pelo método direto e semidireto	60
Figura 2.15 – Relação entre resistência à compressão e VPU	60
Figura 2.16 – Ensaio ultrassônico em tijolos cerâmicos	61
Figura 2.17 – Relação entre absorção de água e VPU	61
Figura 2.18 – Ensaio ultrassônico em bloco cerâmico	62
Figura 2.19 – Aplicação do ultrassom em alvenaria <i>in situ</i>	62

Figura 2.20 – Aplicação do ultrassom em parede de alvenaria	63
Figura 2.21 – Variação da velocidade sônica em paredes de alvenaria com juntas defeituosas e reforçadas	64
Figura 2.22 – Ensaio ultrassônico em painel de alvenaria	64
Figura 2.23 – Tomografia ultrassônica aplicada em tijolos e pilares de alvenaria	65
Figura 2.24 – Pilares defeituosos de alvenaria para ensaio tomográfico	65
Figura 2.25 – Tomogramas obtidos para os diferentes pilares	66
Figura 2.26 – Variação da VPU com o nível de tensão aplicado em tijolos de granito.....	67
Figura 2.27 – Variação da VPU com o nível de tensão aplicado em tijolos de granito.....	68
Figura 2.28 – Variação da VPU com o nível de tensão aplicado em tijolos de calcário	68
Figura 2.29 – Monitoramento da VPU em parede de tijolos sob tensão	69
Figura 2.30 – (a) Ensaio de acustoelasticidade e (b) curva acustoelástica de tijolos de concreto celular autoclavado	69
Figura 2.31 – Ensaio de acustoelasticidade em prisma de alvenaria estrutural	70
Figura 2.32 – Curvas acustoelásticas de prismas de alvenaria estrutural	70
Figura 3.1 – Bloco cerâmico com paredes maciças	74
Figura 3.2 – Relações entre (a) absorção de água e porosidade e (b) absorção de água e densidade aparente	79
Figura 3.3 – Ensaio de resistência à compressão em bloco cerâmico.....	80
Figura 3.4 – Diagramas tensão x deformação dos blocos cerâmicos das séries I, II e III	80
Figura 3.5 – Modo de ruptura dos blocos cerâmicos	82
Figura 3.6 – Equipamentos e materiais utilizados no ensaio ultrassônico: a) aparelho de ultrassom Pundit Lab ⁺ , b) transdutores de cisalhamento com 250 kHz, c) gel acoplante e d) cilindro de calibração	83
Figura 3.7 – Metodologia para realização dos ensaios ultrassônicos ao longo da (a) altura, (b) comprimento e (c) largura dos blocos cerâmicos.....	84
Figura 3.8 – Realização dos ensaios ultrassônicos ao longo da (a) altura, (b) comprimento e (c) largura dos blocos cerâmicos.....	85
Figura 3.9 – Posicionamento dos transdutores ultrassônicos em relação à região de propagação das ondas ultrassônicas	86
Figura 3.10 – Sinais ultrassônicos típicos em blocos cerâmicos para análise de (a) ondas longitudinais e (b) ondas transversais	87
Figura 3.11 – Variação da velocidade ultrassônica (a) longitudinal e (b) transversal ao longo de cada uma das direções ortogonais	90

Figura 3.12 – Processo de extrusão de bloco cerâmico na direção da altura	91
Figura 3.13 – Variação da velocidade de pulso ultrassônico (a) longitudinal e (b) transversal ao longo das diferentes regiões da largura do bloco.....	92
Figura 3.14 - Variação da velocidade de pulso ultrassônico (a) longitudinal e (b) transversal ao longo das diferentes regiões da altura do bloco.....	92
Figura 3.15 – Região do bloco cerâmico com baixos valores de velocidade ultrassônica.....	93
Figura 3.16 - Variação da velocidade ultrassônica (a) longitudinal e (b) transversal ao longo de cada uma das direções ortogonais.....	94
Figura 3.17 – Relação entre as velocidades longitudinais e transversais	95
Figura 3.18 – Estimativa do coeficiente de Poisson obtido para os blocos cerâmicos.....	97
Figura 3.19 – Defasagem entre o tempo de chegada das ondas longitudinais e transversais conforme as direções ortogonais	97
Figura 3.20 – Variação dos parâmetros de anisotropia segundo a série dos blocos.....	101
Figura 3.21 – Variação da resistência anisotrópica com (a) absorção de água e (b) porosidade	102
Figura 3.22 – Impacto dos vazios na velocidade de pulso ultrassônico	102
Figura 3.23 – Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e transversal com (a) absorção de água e (b) porosidade	103
Figura 3.24 – Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e transversal com a densidade dos blocos cerâmicos	103
Figura 3.25 – Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e a resistência à compressão dos blocos cerâmicos	104
Figura 3.26 - Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e o módulo de elasticidade estático dos blocos cerâmicos.....	105
Figura 4.1 – Distribuição granulométrica da areia	109
Figura 4.2 – Ensaio para obtenção do índice de consistência da argamassa.....	110
Figura 4.3 – Execução dos prismas de alvenaria estrutural.....	112
Figura 4.4 - Relações entre (a) absorção de água e porosidade e (b) absorção de água e densidade aparente nas argamassas de assentamento.....	113
Figura 4.5 – Ensaio de resistência à compressão da argamassa de assentamento.....	113
Figura 4.6 – Diagrama tensão x deformação das argamassas de assentamento.....	114
Figura 4.7 – Ensaio de resistência à compressão em prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos.....	115
Figura 4.8 – Diagramas tensão x deformação dos prismas de alvenaria das séries I, II e III: (a) prismas de 2 blocos e (b) prismas de 3 blocos	116

Figura 4.9 – Modo de ruptura dos prismas	118
Figura 4.10 – Metodologia de ensaio ultrassônico em corpos de prova de argamassa.....	119
Figura 4.11 – Metodologia de ensaio ultrassônico em prismas de alvenaria estrutural.....	119
Figura 4.12 – Sinal ultrassônico típico em argamassa de assentamento.....	120
Figura 4.13 – Relação entre os módulos de elasticidade longitudinal e transversal das argamassas de assentamento	122
Figura 4.14 – Sinal ultrassônico típico em prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos.....	123
Figura 4.15 – Propagação de onda ultrassônica em interface bloco-junta.....	124
Figura 4.16 – Velocidade de pulso ultrassônico em prismas (a) de 2 blocos e (b) 3 blocos .	125
Figura 4.17 – Junta de assentamento em (a) boas e (b) más condições de interface	126
Figura 4.18 – Variação da velocidade ultrassônica longitudinal em prismas de alvenaria ...	127
Figura 4.19 – Propagação ideal de onda ultrassônica em prisma de alvenaria.....	128
Figura 4.20 – Comparação entre a velocidade teórica e experimental para prismas (a) de 2 blocos e (b) de 3 blocos.....	130
Figura 4.21 – Processo de transferência da água de amassamento da argamassa no estado fresco para a unidade de alvenaria	131
Figura 4.22 – Relação entre as curvas tensão x deformação e a VPU de prismas de alvenaria de 2 blocos da Série II.....	132
Figura 4.23 – Relação entre a curva tensão x deformação do prisma de alvenaria P3 de 2 blocos da Série I.....	133
Figura 4.24 – Relação entre o módulo de elasticidade estático e a velocidade de propagação ultrassônica em prismas (a) de 2 blocos e (b) 3 blocos.....	133
Figura 4.25 – Relação entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação ultrassônica em prismas de alvenaria.....	134
Figura 4.26 – Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático das argamassas	135
Figura 4.27 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para a resistência à compressão dos prismas de alvenaria	137
Figura 4.28 – Comparação entre diferentes modelos teóricos para previsão da resistência à compressão de prismas de alvenaria	138
Figura 4.29 – Relação entre resistência à compressão e deformação de pico em prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos	138
Figura 4.30 – Relação entre a deformação de pico e a razão $E_{s,p}/f_p$ em prismas de alvenaria com (a) 2 blocos e (b) 3 blocos	139

Figura 4.31 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para o módulo de elasticidade estático dos prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos.....	140
Figura 4.32 – Relação teórico/experimental individual quanto ao módulo de elasticidade estático dos prismas de alvenaria.....	141
Figura 4.33 - Comparação entre diferentes modelos teóricos para previsão do módulo de elasticidade estático de prismas de alvenaria	141
Figura 4.34 - Comparação entre as curvas tensão x deformação teóricas e experimentais para os prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos.....	143
Figura 5.1 – (a) Transdutores para ondas transversais, (b) transdutores para ondas longitudinais e (c) caixa seletora de sinais	146
Figura 5.2 – Esquema de ensaio para avaliação do efeito acustoelástico.....	147
Figura 5.3 – Instrumentação para avaliação mecânica nos elementos de alvenaria.....	147
Figura 5.4 – Esquema de aplicação do carregamento durante o ensaio acustoelástico.....	149
Figura 5.5 – Metodologia para avaliação ultrassônica durante o ensaio de acustoelasticidade	150
Figura 5.6 – Ensaio acustoelástico em (a) bloco cerâmico (b) prisma de 2 blocos e (c) prisma de 3 blocos	151
Figura 5.7 – Posicionamento dos transdutores ultrassônicos (a) de cisalhamento e (b) longitudinais em prisma de 3 blocos	151
Figura 5.8 – Metodologia utilizada para análise de resultados a partir da função correlação cruzada (CC).....	153
Figura 5.9 – Sinais ultrassônicos típicos obtidos durante os ensaios de acustoelasticidade ..	153
Figura 5.10 – Sinais ultrassônicos típicos obtidos para ondas longitudinais e transversais sob diferentes níveis de tensão.....	154
Figura 5.11 – Variação relativa da VPU para (a)/(b) V_{11} e (c)/(d) V_{22} das séries I e III.....	155
Figura 5.12 – Variação relativa da VPU para (a) V_{11} e (b) V_{22} da série II.....	156
Figura 5.13 – Variação relativa da VPU para a onda V_{33} da série I.....	157
Figura 5.14 – Curva tensão x deformação típica durante os ensaios de acustoelasticidade...	158
Figura 5.15 – Danos localizados durante os ensaios de acustoelasticidade	159
Figura 5.16 – Variação relativa da VPU para a onda V_{31} nas séries (a) I, (b) II e (c) III.....	160
Figura 5.17 – Metodologia para obtenção dos coeficientes acustoelásticos	161
Figura 5.18 – Variação dos coeficientes acustoelásticos médios dos blocos cerâmicos.....	163
Figura 5.19 – Comparação entre as ondas (a) V_{31} e V_{33} e (b) V_{31} e V_{11}	163
Figura 5.20 – Comparação entre as ondas V_{22} e V_{33}	164

Figura 5.21 – Variação relativa da VPU para a onda V_{11} nas séries I, II e III em prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos	165
Figura 5.22 – Comparação entre prismas de 2 e 3 blocos para ondas V_{11}	166
Figura 5.23 – Variação relativa da VPU para a onda V_{22} nas séries (a) II e (b) III dos prismas de 3 blocos	167
Figura 5.24 – Variação relativa da VPU para a onda V_{33} nas séries (a) I, (b) II e (c) III nos prismas de 2 blocos	167
Figura 5.25 – Variação relativa da VPU para a onda V_{33} nas séries (a) I, (b) II e (c) III nos prismas de 3 blocos	168
Figura 5.26 – Variação relativa da VPU para a onda V_{31} nas séries (a) I, (b) II e (c) III nos prismas de 2 blocos	169
Figura 5.27 – Coeficientes acustoelásticos médios para prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos	170
Figura 5.28 – Comparação entre as ondas V_{11} e V_{31} nos prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos	171
Figura 5.29 – Comparação entre as ondas V_{22} e V_{33} nos prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relações para obtenção da resistência à compressão da alvenaria cerâmica	44
Tabela 2.2 – Relações para obtenção do módulo de elasticidade estático da alvenaria cerâmica	45
Tabela 2.3 – Relação de trabalhos sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria sob tensão....	58
Tabela 3.1 – Especificação dos blocos cerâmicos	74
Tabela 3.2 – Propriedades geométricas dos blocos cerâmicos (mm)	75
Tabela 3.3 – Área bruta, área líquida e relação A_l/A_b	76
Tabela 3.4 – Propriedades físicas dos blocos cerâmicos	78
Tabela 3.5 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos blocos cerâmicos.....	81
Tabela 3.6 – Teste de hipóteses estatístico para as propriedades mecânicas dos blocos	82
Tabela 3.7 – Velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e transversal em blocos cerâmicos	87
Tabela 3.8 – Comprimento de onda nos blocos cerâmicos	89
Tabela 3.9 - Teste de hipóteses estatístico para as velocidades longitudinais e transversais ao longo do comprimento e da largura dos blocos cerâmicos.....	94
Tabela 3.10 – Constantes elásticas dos blocos cerâmicos	96
Tabela 3.11 - Teste de hipóteses estatístico para as constantes elásticas dos blocos	96
Tabela 3.12 – Teste de hipóteses estatístico para o coeficiente de Poisson dos blocos	98
Tabela 3.13 - Parâmetros de anisotropia dos blocos cerâmicos.....	101
Tabela 4.1 – Propriedades físicas dos aglomerantes	108
Tabela 4.2 – Propriedades físicas da areia.....	109
Tabela 4.3 – Composição das argamassas de assentamento	110
Tabela 4.4 – Propriedades avaliadas nos prismas de alvenaria estrutural	111

Tabela 4.5 – Propriedades físicas das argamassas de assentamento.....	112
Tabela 4.6 – Propriedades mecânicas da argamassa de assentamento	114
Tabela 4.7 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos prismas cerâmicos	117
Tabela 4.8 – Teste de hipóteses estatístico para as propriedades mecânicas dos prismas de 2 blocos e [3 blocos]	117
Tabela 4.9 – Propriedades dinâmicas das argamassas de assentamento.....	121
Tabela 4.10 – Teste de hipóteses estatístico para a velocidade de pulso ultrassônico dos prismas de 2 e 3 blocos	126
Tabela 4.11 – Teste de hipóteses estatístico referente à comparação entre a velocidade de pulso ultrassônico dos prismas de 2 e 3 blocos.....	127
Tabela 4.12 – Velocidade de pulso ultrassônico longitudinal em prismas de alvenaria.....	128
Tabela 5.1 – Quantidade de corpos de prova avaliados quanto ao efeito acustoelástico.....	146
Tabela 5.2 – Condições de carregamento aplicado conforme elemento de alvenaria	148
Tabela 5.3 – Coeficientes acustoelásticos individuais para cada bloco cerâmico	162
Tabela 5.4 – Coeficientes acustoelásticos médios para cada série de resistência.....	162
Tabela 5.5 – Coeficientes acustoelásticos individuais para cada prisma de 2 blocos.....	169
Tabela 5.6 – Coeficientes acustoelásticos individuais para cada prisma de 3 blocos.....	169
Tabela A.1 – Valores críticos para o teste de Grubbs	190

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
CH	Cal Hidráulica
CP	Cimento Portland
CPs	Corpos de Prova
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
CV	Coeficiente de Variação
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EN	Norma Europeia
LE	Laboratório de Estruturas
LMCC	Laboratório de Materiais e Construção Civil
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
USP	Universidade de São Paulo
VPU	Velocidade de Pulso Ultrassônico

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas

A_b	Área bruta de um elemento de alvenaria estrutural
A_i	Ponto de medida ultrassônica ao longo da altura do bloco
A_{ij}	Coefficiente acustoelástico de uma onda propagada em i e polarizada em j
A_l	Área líquida de um elemento de alvenaria estrutural
C_i	Ponto de medida ultrassônica ao longo do comprimento do bloco
C_{ij}	Constantes elásticas
D	Índice de dano
E, E_d	Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal
$E_{d,a}$	Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal da argamassa
E_i	Transdutor ultrassônico emissor no ponto i
E_s	Módulo estático secante
$E_{s,1^\circ}$	Módulo de elasticidade estático no 1º ciclo de carregamento
$E_{s,11^\circ}$	Módulo de elasticidade estático no 11º ciclo de descarregamento
$E_{s,a}$	Módulo de elasticidade estático da argamassa de assentamento
$E_{s,b}$	Módulo de elasticidade estático dos blocos cerâmicos
$E_{s,p}$	Módulo de elasticidade estático dos prismas de alvenaria
f_a	Resistência média à compressão da argamassa de assentamento
f_b	Resistência média à compressão dos blocos cerâmicos
f_{bk}	Resistência característica à compressão dos blocos cerâmicos
f_p	Resistência média à compressão dos prismas de alvenaria
f_{pk}	Resistência característica à compressão dos prismas de alvenaria na área bruta
$G_{d,a}$	Módulo de elasticidade dinâmico transversal da argamassa
G, G_d	Módulo de elasticidade dinâmico transversal
h	Altura de um bloco cerâmico
K	Módulo volumétrico
k_i	Parâmetro para previsão das propriedades mecânicas de um prisma
l	Constante elástica de Murnaghan
L_i	Ponto de medida ultrassônica ao longo da largura do bloco
m	Constante elástica de Murnaghan
M_a	Massa aparente de um bloco cerâmico
M_s	Massa seca de um bloco cerâmico
M_u	Massa saturada de um bloco cerâmico
n	Constante elástica de Murnaghan
OL_{ii}	Onda longitudinal propagada na direção i
OT_{ij}	Onda transversal propagada na direção i e polarizada na direção j
$P_{máx}$	Máxima carga aplicada durante o ensaio de acustoelasticidade
R^2	Coefficiente de determinação

R_i	Transdutor ultrassônico receptor no ponto i
$R_{\Delta M}$	Resistência anisotrópica de um bloco cerâmico
t, T_c	Tempo central da função correlação cruzada
t_a	Tempo de percurso de uma onda ultrassônica pela junta de argamassa
t_b	Tempo de percurso de uma onda ultrassônica pelo bloco
t_p	Tempo de percurso de uma onda ultrassônica pelo prisma
T	Intervalo de análise da função correlação cruzada
T_{crit}	Valor crítico para T em uma amostra no teste estatístico T
T_{value}	Valor T em uma amostra no teste estatístico T
u_{np}	Sinal não perturbado na função correlação cruzada
u_p	Sinal perturbado na função correlação cruzada
V_{ij}	Velocidade de onda ultrassônica propagada na direção i e polarizada na direção j
$V_{L,a}$	Velocidade de onda ultrassônica longitudinal média na argamassa
$V_{L,b}$	Velocidade de onda ultrassônica longitudinal média nos blocos
$V_{Lb,A}$	Velocidade de onda ultrassônica longitudinal ao longo da altura no bloco
$V_{Lb,C}$	Velocidade de onda ultrassônica longitudinal ao longo do comprimento no bloco
$V_{Lb,L}$	Velocidade de onda ultrassônica longitudinal ao longo da largura no bloco
$V_{Lb,máx}$	Velocidade ultrassônica longitudinal máxima no bloco
$V_{Lb,mín}$	Velocidade ultrassônica longitudinal mínima no bloco
$V_{L,p}$	Velocidade de onda ultrassônica longitudinal média nos prismas
$V_{L,p-teo}$	Velocidade de onda ultrassônica longitudinal teórica nos prismas
V_p	Velocidade de uma onda longitudinal
V_s	Velocidade de uma onda transversal
$V_{T,a}$	Velocidade de onda ultrassônica transversal média na argamassa
$V_{T,b}$	Velocidade de onda ultrassônica transversal média no bloco
$V_{Tb,A}$	Velocidade de onda ultrassônica transversal ao longo da altura no bloco
$V_{Tb,C}$	Velocidade de onda ultrassônica transversal ao longo do comprimento no bloco
$V_{Tb,L}$	Velocidade de onda ultrassônica transversal ao longo da largura no bloco

Letras gregas

α	Índice de absorção de água
α_c	Índice de absorção de água por capilaridade
δ_i	Constantes para obtenção da curva tensão x deformação em um prisma
ε	Deformação
ε_{up}	Deformação última da curva tensão x deformação de um prisma
ε_{yp}	Deformação de pico da curva tensão x deformação de um prisma
λ	Primeiro parâmetro de Lamé
λ_o	Comprimento de onda
$\lambda_{o,máx}$	Comprimento de onda máximo
$\lambda_{o,mín}$	Comprimento de onda mínimo
η	Porosidade
Δ_a	Diferença entre ondas longitudinais e transversais na altura
$\Delta_{s,b}$	Distância percorrida por uma onda em um bloco
Δ_c	Diferença entre ondas longitudinais e transversais no comprimento
$\Delta_{s,a}$	Distância percorrida por uma onda em uma junta de argamassa
Δ_l	Diferença entre ondas longitudinais e transversais na largura
Δ_M	Grau de anisotropia de um bloco cerâmico
$\Delta V/V_0$	Variação relativa da velocidade de pulso ultrassônico
ρ	Densidade específica

σ	Tensão
σ_{11}	Tensão normal aplicada ao longo da direção 1
$\sigma_{\text{máx}}$	Máxima tensão atuando no bloco na área bruta
γ	Densidade aparente
γ_a	Massa específica da água
ν	Coefficiente de Poisson
ν_a	Coefficiente da argamassa
$\nu_{b,A}$	Coefficiente de Poisson estimado para o bloco na direção da altura
$\nu_{b,C}$	Coefficiente de Poisson estimado para o bloco na direção do comprimento
$\nu_{b,L}$	Coefficiente de Poisson estimado para o bloco na direção da largura
χ	Parâmetro para previsão das propriedades mecânicas de um prisma

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	33
1.1	OBJETIVOS	35
1.2	JUSTIFICATIVA	36
1.3	METODOLOGIA.....	37
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	39
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	41
2.1	ELEMENTOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL	41
2.2	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS ULTRASSÔNICOS.....	45
2.3	TEORIA DA ACUSTOELASTICIDADE	49
2.4	APLICAÇÃO DO ULTRASSOM NA ALVENARIA	52
2.4.1	Caracterização de materiais	58
2.4.2	Diagnóstico e identificação de defeitos.....	63
2.4.3	Avaliação ultrassônica sob tensões.....	66
2.5	RESUMO DO CAPÍTULO	70
3	CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO ULTRASSÔNICA SEM TENSÃO: BLOCOS CERÂMICOS.....	73
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	73
3.1.1	Caracterização geométrica	75
3.1.2	Caracterização física	77

3.1.3	Caracterização mecânica	79
3.1.4	Avaliação ultrassônica	82
3.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
3.2.1	Variação da VPU em blocos cerâmicos	89
3.2.2	Comportamento anisotrópico dos blocos cerâmicos	95
3.2.3	Relação entre VPU e as propriedades físico-mecânicas	102
3.3	RESUMO DO CAPÍTULO	106
4	CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO ULTRASSÔNICA SEM TENSÃO: PRISMAS DE ALVENARIA	107
4.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	107
4.1.1	Argamassas de assentamento	108
4.1.2	Prismas de alvenaria	111
4.1.3	Caracterização física	112
4.1.4	Caracterização mecânica	113
4.1.5	Avaliação ultrassônica	118
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	120
4.2.1	Variação da VPU em prismas de alvenaria	123
4.2.2	Redução da VPU na interface bloco-junta	128
4.2.3	Influência da deformabilidade dos prismas na VPU	132
4.3	ANÁLISE TEÓRICA	134
4.3.1	Previsão da resistência à compressão dos prismas em função da VPU dos materiais constituintes	134
4.3.2	Previsão do módulo de elasticidade estático dos prismas em função da VPU dos materiais constituintes	138
4.3.3	Previsão do comportamento tensão x deformação dos prismas em função da VPU dos materiais constituintes	141
4.4	RESUMO DO CAPÍTULO	143

5	ACUSTOELASTICIDADE E AVALIAÇÃO ULTRASSÔNICA SOB TENSÃO: BLOCOS E PRISMAS.....	145
5.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	145
5.1.1	Materiais e equipamentos.....	145
5.1.2	Ensaio mecânicos.....	146
5.1.3	Avaliação ultrassônica.....	149
5.1.4	Procedimento para extração de resultados.....	151
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	153
5.2.1	Varição relativa da VPU com a tensão em blocos cerâmicos.....	155
5.2.2	Varição relativa da VPU com a tensão em prismas de alvenaria.....	164
5.3	RESUMO DO CAPÍTULO.....	172
6	CONCLUSÕES.....	173
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	179
	APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DO TESTE ESTATÍSTICO DE GRUBBS.....	189
	APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS TESTES ESTATÍSTICOS F E T.....	191
	APÊNDICE C – CURVAS ACUSTOELÁSTICAS.....	193

1 INTRODUÇÃO

De modo geral, a alvenaria é um material compósito formado por blocos, argamassa de assentamento, e eventualmente conta com a presença de armaduras e envolvimento da mesma com graute. A alvenaria estrutural constitui uma solução técnica caracterizada pela presença de paredes que possuem capacidade portante, cuja transmissão das ações ocorre por meio das tensões de compressão, conforme esclarecem Ramalho e Corrêa (2003).

De acordo com Corrêa (2012), essa é uma das soluções estruturais mais antigas utilizadas pelo homem e manteve-se como um dos principais materiais utilizados na construção, durante um período onde o seu emprego era fundamento basicamente em métodos empíricos, embora alguns códigos e notas técnicas também já tenham sido empregados no passado. Segundo Hendry, Sinha e Davies (2004), posteriormente esta solução passou a ser preterida em relação aos sistemas estruturais em aço e concreto armado porque o seu emprego resultava em paredes excessivamente espessas nas edificações mais altas, ocasionando na perda de espaço útil interno, material e tempo de construção.

No entanto, com a implantação de políticas públicas e a criação de programas habitacionais nos últimos anos, este sistema estrutural tem sido amplamente utilizado devido a diversas vantagens técnicas e econômicas como a racionalização da construção, redução de custos e velocidade do processo executivo, sendo atualmente empregado em diversas edificações residenciais e comerciais de pequeno e grande porte em todo o país (Figura 1.1).

De maneira imprescindível, as estruturas em alvenaria sujeitam-se ao processo natural de degradação ao longo do tempo, que pode ser maximizado por fatores como a ausência de manutenção na estrutura, a baixa qualidade dos materiais utilizados, falhas durante a execução da obra ou ainda o uso inadequado da construção. Neste contexto, as técnicas de inspeção e controle são importantes ferramentas no diagnóstico e reabilitação de tais elementos estruturais em alvenaria.

No tocante às técnicas de inspeção, os ensaios não destrutivos têm sido largamente aplicados para a avaliação de diferentes estruturas e materiais. Tais procedimentos são

caracterizados pela baixa danificação provocada nas amostras analisadas, flexibilidade e reprodutibilidade durante a realização da investigação, além de apresentarem vantagens econômicas, tendo em vista a baixa ou nenhuma necessidade de reparos após o processo.

Figura 1.1 – Edifícios em alvenaria estrutural com blocos cerâmicos



Fonte: Sanchez (2021) e CVF Incorporadora (2023)

Dentre as técnicas não destrutivas, o método da velocidade de pulso ultrassônico apresenta-se como uma alternativa eficaz e consistente para a análise de estruturas e materiais. Este método caracteriza-se pela obtenção da velocidade de propagação de um pulso ultrassônico que percorre o material e permite a avaliação de características como a homogeneidade, profundidade de fissuras, detecção de vazios, presença de falhas e variações do material ao longo do tempo (ABNT NBR 8802:2019; ABNT NBR 16805:2020).

Neste sentido, o método da velocidade de pulso ultrassônico (VPU) pode ser aplicado com diversas finalidades no âmbito da alvenaria estrutural, sendo uma das principais a caracterização dos materiais e elementos estruturais empregados no sistema, como os blocos, argamassa de assentamento e os prismas, que por sua vez são muito utilizados no controle de qualidade das obras e ensaiados rotineiramente através dos ensaios tradicionais.

Além disso, a velocidade de pulso ultrassônico também possibilita a avaliação do nível de tensão dos materiais com base na teoria da acustoelasticidade. Esta teoria foi inicialmente descrita de maneira analítica por Hughes e Kelly (1953) e correlaciona a variação na velocidade de pulso ultrassônico com a tensão aplicada no material, resultando em um fenômeno conhecido como efeito acustoelástico. Dessa maneira, de posse da variação na velocidade de propagação no material analisado, é possível obter o nível de tensão cujo mesmo está submetido.

Neste contexto específico, a avaliação do nível de tensão nos elementos de alvenaria estrutural enquadra-se como um dos principais fatores para a compreensão da distribuição de

ações verticais no conjunto de painéis de alvenaria que compõem a estrutura. Entretanto, embora de suma importância para a análise e verificação do comportamento estrutural destes elementos, a distribuição de ações verticais ainda é compreendida de forma parcial. Segundo Haach (2017), tal fato está associado a enorme dificuldade na medição das tensões nas paredes, cujo procedimento usual carece de uma grande quantidade de sensores, que em geral apresentam apenas resultados pontuais da distribuição ao longo da estrutura.

Sob esta perspectiva, a medição das tensões a partir da teoria da acustoelasticidade por meio do método de velocidade de pulso ultrassônico apresenta-se como uma alternativa viável para este tipo de análise. Contudo, embora o efeito acustoelástico tenha sido objeto de estudos recentes em elementos de aço, concreto e rochas, a aplicação desta teoria para a avaliação de elementos de alvenaria é extremamente escassa e sofre alterações significativas mediante a alta variabilidade dos materiais que são utilizados no sistema. Assim, os ensaios não destrutivos ultrassônicos associados à teoria da acustoelasticidade oferecem uma possibilidade de contribuição para a compreensão deste fenômeno, além de se portarem como opções interessantes para maiores investigações nos elementos de alvenaria estrutural, como a própria avaliação das suas propriedades físicas e mecânicas mediante relações com a velocidade de pulso ultrassônico.

Diante disso, neste trabalho foi realizada uma avaliação em elementos de alvenaria estrutural compostos por blocos cerâmicos utilizando os ensaios não destrutivos ultrassônicos. Para tal, um amplo estudo experimental foi realizado em blocos e prismas de alvenaria estrutural avaliados inicialmente na forma livre de tensões com vistas à caracterização das propriedades físico-mecânicas e posteriormente submetidos à ensaios ultrassônicos simultaneamente a aplicação de carregamento de compressão uniaxial com o objetivo de avaliar o efeito acustoelástico.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar elementos de alvenaria estrutural formados por blocos cerâmicos através do método de velocidade de pulso ultrassônico, aplicado em elementos submetidos a tensões uniaxiais de compressão ou livres de qualquer tensão.

Para realização de tal objetivo, desenvolveram-se os seguintes objetivos específicos:

- Determinar o grau de anisotropia dos blocos cerâmicos estruturais por meio da velocidade de pulso ultrassônico nas diferentes direções do elemento;
- Analisar a variação da velocidade de pulso ultrassônico em prismas de alvenaria e

sua relação com a atenuação das ondas na interface bloco-junta;

- Obter relações teóricas entre as principais propriedades físicas e mecânicas dos blocos e prismas com a velocidade de pulso obtida através dos ensaios não destrutivos ultrassônicos;
- Avaliar o comportamento do efeito acustoelástico nos elementos de alvenaria a partir de medidas diretas e indiretas de velocidade de pulso ultrassônico;
- Definir os coeficientes acustoelásticos da alvenaria, que expressam a relação entre a variação da velocidade de pulso ultrassônico e o nível de tensão aplicado.

1.2 JUSTIFICATIVA

Conforme mencionado anteriormente, os sistemas estruturais em alvenaria têm sido amplamente utilizados no Brasil, mediante vantagens técnicas e econômicas associadas ao seu emprego. No entanto, o desgaste natural que ocorre ao longo da vida útil da estrutura, associado com a dificuldade na compreensão dos fenômenos físico-mecânicos que governam o comportamento estrutural, evidentemente poderão implicar em falhas estruturais ou induzir procedimentos onerosos de recuperação e reabilitação dos elementos estruturais.

Neste sentido, a realização de ensaios ultrassônicos para avaliação das propriedades dos elementos de alvenaria é de grande valia prática, tendo em vista a numerosa quantidade de ensaios destrutivos que usualmente são realizados para realizar tal avaliação. Além disso, a distribuição das ações verticais na alvenaria estrutural é um tema complexo e de difícil abordagem experimental. Neste sentido, a avaliação do efeito acustoelástico e a obtenção do nível de tensão nos elementos de alvenaria através de um ensaio não destrutivo é uma ferramenta interessante para avaliação adequada das estruturas em serviço e abordagem da distribuição das ações verticais nesses elementos de alvenaria.

Desta forma, um dos alicerces desta proposta é a possibilidade de emprego do ultrassom para avaliação da VPU nos materiais constituintes do sistema alvenaria e a avaliação do nível de tensão nos elementos de alvenaria estrutural a partir da aplicação da teoria da acustoelasticidade aliada ao uso do método de velocidade de pulso ultrassônico, tendo em vista as vantagens que esse método oferece, tais como baixo custo e nível de danificação na estrutura.

Salienta-se ainda que a literatura técnica reportada sobre o assunto é substancialmente escassa. No âmbito da caracterização dos materiais, a maior parte dos trabalhos realizam a aplicação do ultrassom em tijolos cerâmicos maciços, o que foge da realidade prática

brasileira. Além disso, no âmbito da avaliação ultrassônica sob tensão, embora o objetivo das pesquisas já realizadas estivesse ligado com a relação entre a velocidade de pulso ultrassônico e o nível de tensão aplicado, também são focadas na avaliação de tijolos de diferentes materiais, tais como o granito, calcário e concreto celular autoclavado. Acrescenta-se ainda que no âmbito nacional, apenas o trabalho de Gondim (2022) realizado com blocos vazados de concreto encontra-se na lista de trabalhos que investigaram o efeito acustoelástico.

Por conta dessa deficiência e grande utilização dos sistemas em alvenaria estrutural com blocos cerâmicos em nosso país, julga-se relevante a elaboração de um trabalho de pesquisa em que seja realizada uma investigação teórica e experimental que visa ampliar o conhecimento sobre a caracterização não destrutiva destes elementos, sobre o fenômeno da acustoelasticidade, e favorecer a aplicação dos ensaios não destrutivos para controle de qualidade dos elementos de alvenaria.

Cabe ressaltar que este projeto se insere no grupo de pesquisas em ensaios não destrutivos do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (SET – EESC/USP), que nos últimos anos tem logrado êxito com a aplicação dessas técnicas na caracterização de materiais como concreto, argamassa e unidades de alvenaria estrutural.

1.3 METODOLOGIA

Este trabalho consistiu na realização de um estudo experimental que visava realizar uma avaliação ultrassônica em elementos de alvenaria estrutural submetidos a diferentes níveis de carregamento. Para elementos livres de tensão, o principal objetivo relacionava-se com a aplicação da VPU para avaliação das propriedades físico-mecânica dos elementos e para elementos sob tensão, o estudo tinha como interesse a investigação do efeito acustoelástico nestes elementos. Para realização do trabalho, esta pesquisa foi dividida basicamente em quatro etapas principais.

A primeira constituiu-se de uma revisão bibliográfica para que os principais conceitos sobre os sistemas em alvenaria estrutural, ensaios não destrutivos ultrassônicos e a teoria da acustoelasticidade pudessem ser discutidos e aplicados de maneira técnica e consistente nos campos desse trabalho. Nesta etapa, também se realizou um levantamento bibliográfico para identificação dos principais trabalhos na área, que por sua vez foram descritos no âmbito da caracterização dos materiais, diagnóstico e avaliação ultrassônica destes sob tensão.

Posteriormente, foram realizados os ensaios experimentais para avaliação do

comportamento físico-mecânico nos blocos utilizados no decorrer da pesquisa. Tais ensaios consistiram na obtenção das propriedades geométricas, físicas e mecânicas dos blocos cerâmicos, que por sua vez também foram avaliados por meio do método da velocidade de pulso ultrassônico.

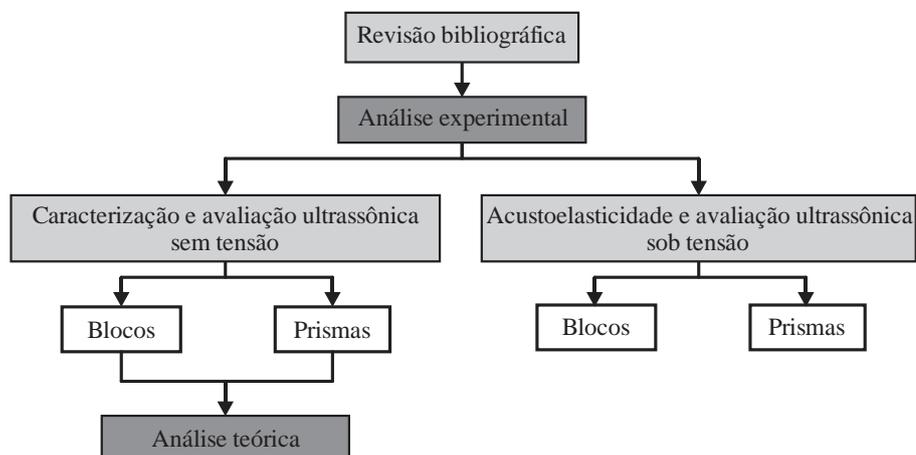
Após a caracterização destes materiais, iniciaram-se os ensaios para avaliação do comportamento físico e mecânico das argamassas de assentamento e dos prismas de alvenaria. Neste ponto, ensaios ultrassônicos utilizando medidas diretas foram realizados em prismas de 2 e 3 blocos com o objetivo de avaliar a variação da VPU nestes elementos estruturais e relacioná-la com as demais propriedades mecânicas obtidas de maneira estática para através do desenvolvimento de um modelo teórico que possibilitava a obtenção de tais propriedades através das velocidades de pulso ultrassônico dos materiais constituintes.

Acrescenta-se que a escolha pela utilização de duas geometrias de prismas deve-se ao fato de que os prismas de 2 blocos são normatizados e tidos como os principais corpos de prova da alvenaria, e também pela razão de que nos prismas de 3 blocos há uma menor interferência dos efeitos de restrição e confinamento impostos aos prismas pelos pratos das prensas, uma vez que o bloco central está totalmente livre de confinamento proveniente do equipamento de ensaio.

Por último, blocos e prismas sujeitaram-se a ensaios mecânicos simultaneamente com a realização dos ensaios ultrassônicos não destrutivos, com o objetivo de se avaliar o surgimento do efeito acustoelástico nestes elementos de alvenaria. Dessa forma, espera-se que com os resultados obtidos neste trabalho possam produzir informações quanto aos parâmetros, procedimentos e correlações que possam colaborar com esta linha de pesquisa no futuro.

Tal metodologia pode ser visualizada de maneira simplificada através da Figura 1.2.

Figura 1.2 – Metodologia utilizada no trabalho



Fonte: Autoria própria.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste trabalho, o capítulo 1 aborda as considerações iniciais da pesquisa, os objetivos do trabalho e busca-o inserir no contexto dos ensaios não destrutivos ultrassônicos aplicados aos elementos de alvenaria.

No capítulo 2 foram apresentadas as principais informações levantadas a partir de um estudo bibliográfico, apontando as principais linhas de pesquisa sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria, bem como apresenta uma descrição de alguns trabalhos relacionados à temática. Além disso, uma breve contextualização sobre os sistemas em alvenaria estrutural, o método da velocidade de pulso ultrassônico e a teoria da acustoelasticidade foi apresentada.

O capítulo 3 apresenta a primeira etapa do programa experimental do trabalho, onde foi realizada a caracterização geométrica, física e mecânica dos blocos cerâmicos, além da avaliação ultrassônica sem tensão nestes elementos segundo o método da velocidade de pulso ultrassônico.

O capítulo 4 aborda a etapa experimental em que foram realizados os ensaios de caracterização física e mecânica em argamassas e prismas de alvenaria através dos ensaios tradicionais, e posteriormente apresenta a avaliação ultrassônica nestes elementos livres de tensão. Ao final, um modelo teórico foi proposto com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico nestes prismas mediante utilização das velocidades ultrassônicas de seus materiais constituintes.

No capítulo 5 foram apresentados os ensaios ultrassônicos realizados em elementos de alvenaria submetidos a diferentes níveis de carregamentos de compressão uniaxial e posteriormente foram descritos os resultados e discussões relacionadas à investigação do efeito acustoelástico em blocos e prismas de alvenaria estrutural.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as principais conclusões deste trabalho, bem como indica sugestões nesta mesma linha de pesquisa para que trabalhos futuros possam abordá-las.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo discorrerá brevemente sobre os principais conceitos e aplicações envolvidas na temática deste trabalho, que por sua vez envolve as características dos elementos de alvenaria estrutural e o emprego do método da velocidade de pulso ultrassônico tanto na caracterização, quanto na investigação do efeito acustoelástico nos elementos de alvenaria sob tensão. Além disso, alguns dos principais trabalhos técnicos ligados à aplicação do ultrassom nos elementos de alvenaria estrutural também foram apresentados, conforme a aplicação desta técnica na caracterização de materiais, no diagnóstico e na avaliação dos mesmos quando submetidos à diferentes níveis de tensão.

2.1 ELEMENTOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL

Atualmente, a alvenaria é um dos sistemas construtivos mais usuais que existem. De acordo com Mohamad (2007), as grandes vantagens econômicas proporcionadas pela alvenaria estão ligadas à otimização do processo de construção através da utilização de técnicas simplificadas de execução, facilidade no controle das diversas etapas das obras e redução do desperdício de materiais, pela economia de fôrmas, revestimentos e especialidades de mão de obra. No Brasil, o projeto, execução, controle de obras e requisitos dos principais elementos e componentes dos sistemas em alvenaria estrutural é normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Para os blocos de concreto, as recomendações são realizadas através da ABNT NBR 6136:2016 e para os blocos cerâmicos, as prescrições são realizadas por meio da ABNT NBR 15270:2017. Além disso, a ABNT NBR 16868:2020 rege o projeto deste sistema com ambos os materiais.

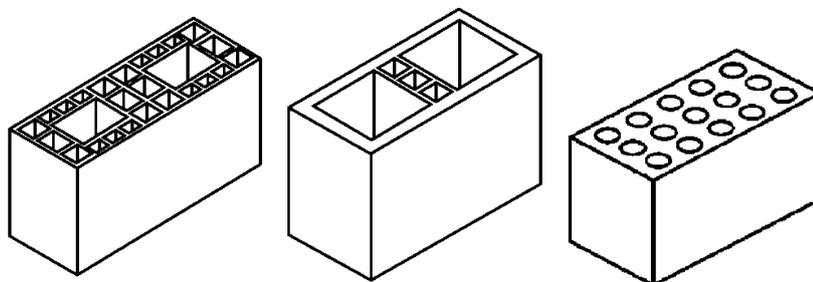
Conforme mencionado anteriormente, a alvenaria estrutural é um sistema compósito formado por diferentes tipos de componentes que influenciam diretamente no comportamento dos elementos estruturais. Dentre estes componentes, os tijolos cerâmicos são as unidades de alvenaria mais utilizadas no mundo ao longo do tempo, e sua utilização torna-se viável pela

presença de jazidas de argila, principal matéria prima na produção, em diversas regiões do mundo, além do histórico de durabilidade e estética agradável (Parsekian, Hamid e Drysdale, 2014).

Por outro lado, a ABNT NBR 15270-1:2017 define os blocos cerâmicos estruturais como sendo aqueles com características e propriedades específicas para alvenaria estrutural e, que possuem furos ou vazados prismáticos, produzidos para serem assentados com os furos ou vazados na vertical. Os blocos estruturais devem apresentar resistência característica mínima de 3,0 MPa e são classificados quanto à seção transversal entre blocos cerâmicos de paredes vazadas, blocos cerâmicos de paredes maciças, cujas paredes externas são maciças e as internas podem ser maciças ou vazadas, e blocos cerâmicos alveolares, conforme ilustrado na Figura 2.1.

A argamassa de assentamento é utilizada para solidarizar e permitir a aderência entre as unidades de alvenaria, uniformizar e transmitir as tensões atuantes entre estes. Além disso, Ramalho e Corrêa (2003) afirmam que as juntas de argamassa também são capazes de absorver pequenas deformações e resistir às condições ambientais ao longo do tempo, impedindo entrada de água e vento nas edificações.

Figura 2.1 – Blocos cerâmicos estruturais com parede vazada, maciça e alveolar



Fonte: Adaptada da ABNT NBR 15270-1:2017.

As argamassas são compostas basicamente de cimento, cal, areia e água. Em geral, o cimento é o principal responsável pela resistência mecânica da mistura, porém, quando usado em quantidades exacerbadas, apesar da elevada resistência, tem-se uma redução na trabalhabilidade e capacidade de acomodação das deformações. A cal contribui para a trabalhabilidade e capacidade de deformação, no entanto, reduz a capacidade resistente da argamassa. Neste âmbito, a areia é um material de baixo custo que viabiliza o uso das misturas de argamassa, através da substituição dos aglomerantes que são mais dispendiosos.

A avaliação das propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido é de suma importância para adequada caracterização da mesma. No estado fresco, a propriedade de maior significado é a trabalhabilidade, que por sua vez, é avaliada através do índice de

consistência, que pode ser obtido através do ensaio de consistência descrito na ABNT NBR 13276:2016, onde a argamassa é moldada em um tronco de cone e submetida a uma série de 30 golpes em 30 segundos em uma mesa de consistência.

Entre as características mais importantes da argamassa no estado endurecido estão a aderência e a resistência à compressão. Segundo Oliveira (2014), a aderência pode ser definida como a capacidade de transferir tensões de tração e de cisalhamento na interface entre o bloco e a junta de argamassa, se que ocorra a separação entre os dois. A autora destaca ainda que muitos são os fatores que podem influenciar na aderência entre o bloco e a argamassa, destacando-se a relação água/cimento, o teor de água incorporado na mistura, as condições de cura, o tipo de argamassa e as propriedades do bloco.

Quanto à resistência à compressão, a ABNT NBR 16868-1:2020 recomenda que as argamassas destinadas ao assentamento de elementos de alvenaria estrutural devem possuir resistência à compressão limitada a 1,5 vezes a resistência característica especificada do bloco e que a espessura das juntas horizontais sejam executadas com 10 mm. Ramalho e Corrêa (2003) afirmam que a argamassa não contribui de forma significativa para a resistência à compressão das paredes de alvenaria, e que inclusive variações de resistência na argamassa da ordem de 50% pouco influenciariam na resistência à compressão da alvenaria. Os autores também chamam atenção para o fato de que a resistência da parede decresce com o aumento da espessura da junta horizontal de argamassa, por conta da diminuição do confinamento da junta devido ao aumento da espessura. Apesar da baixa influência na resistência à compressão, faz-se necessário descrever que este material possui uma participação significativa na deformabilidade e modo de ruptura dos elementos de alvenaria estrutural (Mohamad *et al.*, 2017).

Neste mesmo sentido, o comportamento mecânico da alvenaria estrutural está associado ao desempenho de cada um dos materiais constituintes do sistema. Em geral, este comportamento é predominantemente influenciado pela resistência das unidades, além de parcelas de contribuição referentes à argamassa de assentamento e execução dos elementos.

A ABNT NBR 16868-2:2020 indica que a resistência característica à compressão simples da alvenaria deve ser obtida através do ensaio de paredes ou estimada como 70% da resistência do prisma, ou 85% da resistência da pequena parede. Segundo Ramalho e Corrêa (2003), esta relação entre a resistência dos elementos de alvenaria estrutural trata-se de um conceito importante que exprime a influência da resistência dos blocos na resistência da alvenaria estrutural, já que os blocos possuem significativa influência na resistência da alvenaria.

No Brasil, os ensaios de resistência à compressão dos prismas são utilizados para a determinação da resistência da alvenaria. Segundo Parsekian, Hamid e Drysdale (2014), tais ensaios também são empregados no controle de qualidade das obras, tendo em vista a praticidade de execução desses corpos de prova e facilidade durante a realização dos ensaios, sem a necessidade de equipamentos de grande porte.

Tendo em vista a grande importância da resistência do prisma, diversas pesquisas na literatura desenvolveram relações empíricas para que esta resistência possa ser obtida através da resistência de seus materiais constituintes. Em sua grande maioria, as relações empíricas seguem a Equação 2.1.

$$f_p = \chi f_b^{k_1} f_a^{k_2} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

f_p é a resistência do prisma de alvenaria;

f_b é a resistência do bloco;

f_a é a resistência argamassa;

χ , k_1 e k_2 são parâmetros do modelo.

Neste sentido, a Tabela 2.1 apresenta alguns dos principais modelos empíricos que podem ser utilizados para estimar a resistência de um prisma de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos.

Tabela 2.1 – Relações para obtenção da resistência à compressão da alvenaria cerâmica

Referência	Modelo
Hendry e Malek (1986)	$f_p = 0,317f_b^{0,531}f_a^{0,208}$
Eurocode 6 (2005)	$f_p = 0,5f_b^{0,7}f_a^{0,3}$
Kaushik et al. (2007)	$f_p = 0,317f_b^{0,866}f_a^{0,134}$
Garzón-Roca et al. (2013)	$f_p = 0,53f_b + 0,93f_a - 10,32$
Lumantarna et al. (2014)	$f_p = 0,75f_b^{0,75}f_a^{0,31}$

Fonte: Autoria própria.

Embora a resistência à compressão da alvenaria seja tratada com maior interesse, diversos autores advertem para algumas situações em que a resistência à tração da mesma pode ser determinante e possui influência direta nos mecanismos de ruptura de alguns elementos. Embora com aplicação usual apenas para unidades maciças, a verificação da resistência à tração nos componentes de alvenaria é regularizada pela ASTM C1006-7:2013.

De maneira similar, o módulo de elasticidade consiste em uma propriedade importante na avaliação do comportamento mecânico da alvenaria, com influência na deformabilidade

dos elementos e nos seus mecanismos de ruptura. De acordo com Mohamad (1998), muitos estudos foram realizados com o objetivo de estabelecer a relação tensão x deformação para a alvenaria estrutural, e conseqüentemente valor do módulo de elasticidade para diferentes tipos de blocos e argamassas.

Assim, diversos códigos normativos apresentam uma relação simplificada que relaciona o módulo de elasticidade de maneira proporcional com a resistência da alvenaria (Equação 2.2). Dessa forma, usualmente essas relações são empregadas na ausência de ensaios experimentais.

$$E_{s,p} = k_3 \cdot f_p \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

$E_{s,p}$ é o módulo de elasticidade estático da alvenaria;

k_3 é um parâmetro do modelo.

Neste sentido, a Tabela 2.2 apresenta alguns dos principais modelos empíricos que podem ser utilizados para estimar o módulo de elasticidade estático da alvenaria com blocos cerâmicos.

Tabela 2.2 – Relações para obtenção do módulo de elasticidade estático da alvenaria cerâmica

Referência	Modelo
CSA S304.1 (2004)	$E_{s,p} = 850 \cdot f_p$
Eurocode 6 (2005)	$E_{s,p} = 1000 \cdot f_p$
ACI530-11 (2011)	$E_{s,p} = 700 \cdot f_p$
ABNT NBR 16868 (2020)	$E_{s,p} = 600 \cdot f_p$

Fonte: Autoria própria.

Conforme Parsekian, Hamid e Drysdale (2014), os primeiros estudos sobre a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência do prisma apontaram proporções variando de 750 a 1000 vezes, porém, ensaios posteriores indicaram valores muito dispersos devido as diferentes configurações do ensaio de prismas, carregamento, instrumentações e métodos de cálculo.

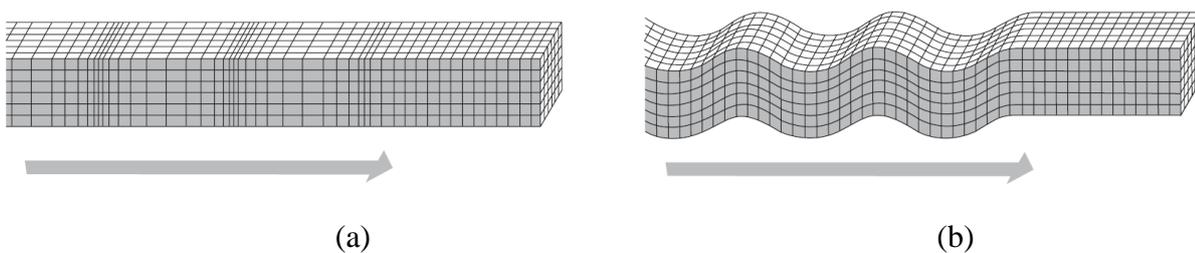
2.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS ULTRASSÔNICOS

O método de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) consiste em uma técnica de ensaio não destrutivo ultrassônico caracterizada pela propagação de uma onda ultrassônica através de um dado material. Os pulsos ultrassônicos emitidos são ondas mecânicas com

frequência superior a 20 kHz e que exigem um meio para sua propagação. Durante o ensaio de ultrassom, obtém-se inicialmente o tempo de propagação das ondas, e as velocidades de propagação são obtidas através da relação com o comprimento conhecido em que a propagação ocorreu.

De maneira geral, usualmente são obtidas as ondas ultrassônicas longitudinais e transversais durante o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico. As ondas ultrassônicas longitudinais também são conhecidas como ondas de compressão (Ondas P) e caracterizam-se por apresentarem uma direção comum para a direção de propagação e a polarização das partículas. Por outro lado, as ondas ultrassônicas transversais ou ondas de cisalhamento (Ondas S) consistem em ondas que apresentam a direção de polarização das partículas perpendicularmente a direção principal de propagação, conforme a Figura 2.2.

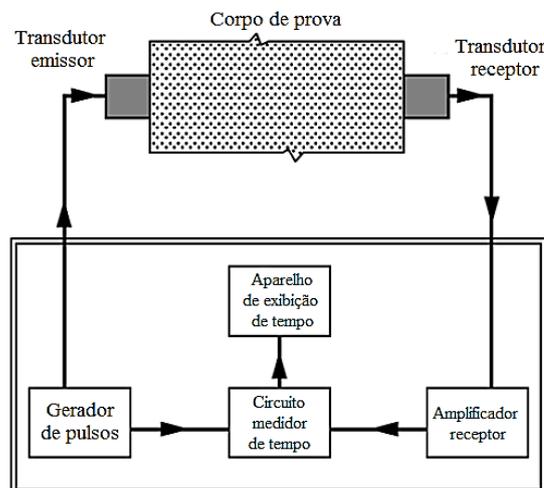
Figura 2.2 – Tipos de ondas: (a) Ondas P ou longitudinais e (b) ondas S ou de cisalhamento



Fonte: Mehta e Monteiro (2006).

O aparato para o ensaio experimental pelo método de velocidade de pulso ultrassônico é composto de dois transdutores para emissão e recepção dos pulsos ultrassônicos, um aparelho de ultrassom com gerador de pulsos e circuito medidor de tempo, e cabos coaxiais que permitem a conexão entre o circuito gerador-receptor, como ilustrado na Figura 2.3.

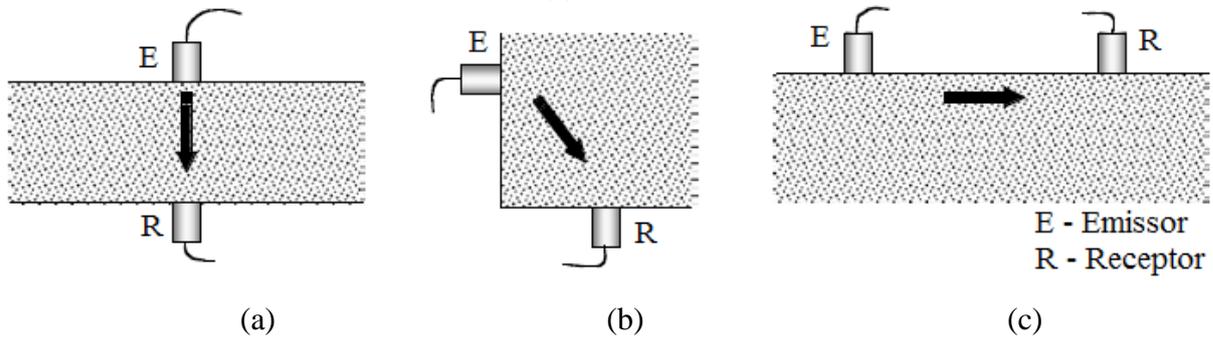
Figura 2.3 – Esquema de funcionamento do ensaio ultrassônico



Fonte: Adaptado de ASTM C597-16 (2016).

No procedimento experimental, os transdutores emissor e receptor podem assumir três diferentes tipos de arranjo mediante o posicionamento dos mesmos. Na transmissão direta (Figura 2.4a) os transdutores são acoplados nas faces opostas do elemento e há uma menor perda de energia durante a propagação do pulso ultrassônico. Nas transmissões semidiretas (Figura 2.4b) e indireta (Figura 2.4c) os transdutores são acoplados nas faces adjacentes e opostas do elemento, respectivamente.

Figura 2.4 – Tipos de arranjo dos transdutores: (a) transmissão direta, (b) transmissão semidireta e (c) transmissão indireta



Fonte: Adaptado de Malhotra e Carino (2004).

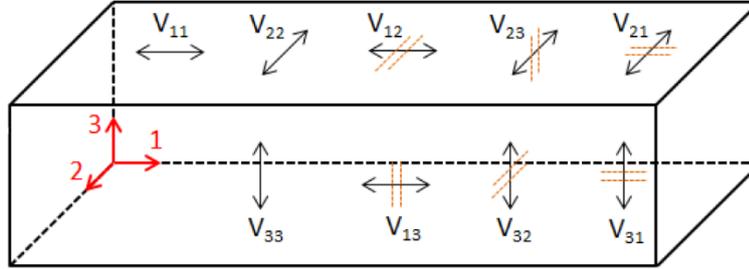
De maneira geral, a velocidade de propagação de uma onda V_{ij} é definida por dois índices, sendo o primeiro (i) referente à direção de propagação da onda e o segundo (j) ligado a direção de polarização da mesma. A partir da velocidade de propagação das ondas é possível obter as propriedades elásticas do material analisado a partir das equações de Christoffel, que por sua vez relaciona o tensor constitutivo (C_{ij}) com a velocidade de propagação das ondas.

Dessa forma, levando-se em consideração a simetria da matriz constitutiva, pode-se dizer que para um material elástico esta matriz possui 21 constantes elásticas independentes. Para materiais ortotrópicos, por conta da simetria em relação aos três eixos axiais perpendiculares, o número de constantes elásticas é reduzido para nove, conforme apresentado pela Equação 2.3.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 2.3}$$

Considerando as velocidades de propagação segundo os três eixos ortogonais, representadas pela Figura 2.5, a obtenção das constantes elásticas do tensor constitutivo pode ser realizada por meio das Equações 2.4 a 2.12.

Figura 2.5 – Orientação das velocidades propagadas e polarizadas



Fonte: Adaptada de Schiavon (2015).

$$C_{11} = \rho V_{11}^2 \quad \text{Equação 2.4}$$

$$C_{22} = \rho V_{22}^2 \quad \text{Equação 2.5}$$

$$C_{33} = \rho V_{33}^2 \quad \text{Equação 2.6}$$

$$C_{44} = \rho \left((V_{23} + V_{32}) / 2 \right)^2 \quad \text{Equação 2.7}$$

$$C_{55} = \rho \left((V_{13} + V_{31}) / 2 \right)^2 \quad \text{Equação 2.8}$$

$$C_{66} = \rho \left((V_{12} + V_{21}) / 2 \right)^2 \quad \text{Equação 2.9}$$

$$(C_{12} + C_{66})n_1n_2 = \left[(C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 - \rho V_\alpha^2) \right]^{1/2} \quad \text{Equação 2.10}$$

$$(C_{13} + C_{55})n_1n_3 = \left[(C_{11}n_1^2 + C_{55}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{55}n_1^2 + C_{33}n_3^2 - \rho V_\alpha^2) \right]^{1/2} \quad \text{Equação 2.11}$$

$$(C_{23} + C_{44})n_2n_3 = \left[(C_{22}n_2^2 + C_{44}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{44}n_2^2 + C_{33}n_3^2 - \rho V_\alpha^2) \right]^{1/2} \quad \text{Equação 2.12}$$

Onde:

V_{ij} é a velocidade propagada na direção i e polarizada na direção j ;

V_α é a velocidade propagada na direção α ;

n_i são os cossenos diretores do ângulo α levando em consideração o eixo de interesse.

ρ é a densidade do material.

Para materiais considerados transversalmente isotrópicos, apenas cinco constantes elásticas são necessárias para caracterizar o material tendo em vista que a isotropia no plano 1-2 acarreta em $C_{22} = C_{33}$, $C_{55} = C_{66}$ e $C_{12} = C_{13}$. Neste mesmo sentido, para materiais considerados isotrópicos e homogêneos, as constantes elásticas são reduzidas a duas, uma vez

que $C_{11} = C_{22} = C_{33}$, $C_{44} = C_{55} = C_{66}$ e $C_{12} = C_{13} = C_{23}$. Para este último caso usual, as propriedades elásticas do material (módulo de elasticidade longitudinal E , módulo de elasticidade transversal G e coeficiente de Poisson ν), podem ser dadas conforme as Equações 2.13 e 2.14.

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad \text{Equação 2.13}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{Equação 2.14}$$

A partir das relações anteriores, o coeficiente de Poisson (ν) pode ainda ser dado por:

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad \text{Equação 2.15}$$

Tal coeficiente também pode ser obtido através da resistência dos materiais através de:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad \text{Equação 2.16}$$

2.3 TEORIA DA ACUSTOELASTICIDADE

De acordo com o efeito acustoelástico, a variação da velocidade de propagação de um pulso ultrassônico em um dado material apresenta uma relação com o nível de tensão aplicado no mesmo material através dos coeficientes acustoelásticos.

A teoria da acustoelasticidade foi desenvolvida por Hughes e Kelly em 1953 descrevendo matematicamente o efeito do estado de tensão sobre a velocidade das ondas ultrassônicas. Segundo Ortega *et al.* (2011), para sólidos isotrópicos submetidos a um estado de tensão uniaxial ao longo da direção 1, as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas ao longo de cada uma daquelas três direções principais podem ser obtidas através das Equações 2.17 a 2.21.

$$\rho V_{11}^2 = \lambda + 2G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[2l + \lambda + \frac{\lambda + G}{G} (4m + 4\lambda + 10G) \right] \quad \text{Equação 2.17}$$

$$\rho V_{12}^2 = \rho V_{13}^2 = G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m + \frac{\lambda n}{4G} + 4\lambda + 4G \right] \quad \text{Equação 2.18}$$

$$\rho V_{22}^2 = \rho V_{33}^2 = \lambda + 2G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[2l - \frac{2\lambda}{G} (m + \lambda + 2G) \right] \quad \text{Equação 2.19}$$

$$\rho V_{21}^2 = \rho V_{31}^2 = G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m + \frac{\lambda n}{4G} + \lambda + 2G \right] \quad \text{Equação 2.20}$$

$$\rho V_{23}^2 = \rho V_{32}^2 = G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m - \frac{\lambda + G}{2G} n - 2\lambda \right] \quad \text{Equação 2.21}$$

Onde:

V_{ij} é a velocidade de propagação da onda ultrassônica segundo a direção i com polarização das partículas na direção j ;

ρ é a densidade do material;

K é o módulo volumétrico;

λ é o primeiro parâmetro de Lamé;

G é o módulo de elasticidade transversal do material ou segundo parâmetro de Lamé;

σ_{11} é a tensão normal aplicada ao longo da direção 1;

l , m e n as constantes elásticas de Murnaghan (1937).

De maneira geral, as propriedades elásticas λ e K podem ser descritas matematicamente através de relações envolvendo o módulo de elasticidade longitudinal e o coeficiente de Poisson, como dado pelas Equações 2.22 e 2.23.

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \text{Equação 2.22}$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad \text{Equação 2.23}$$

Segundo Ortega *et al.* (2011), as relações apresentadas anteriormente nas Equações 2.17 a 2.21 podem ser linearizadas e representadas em função da velocidade da onda no meio submetido a tensão σ_{11} e no meio livre de tensões (V_{ij}^σ e V_{ij}^0 , respectivamente), e do coeficiente acustoelástico A_{ij} do material, mediante as Equações 2.24 ou 2.25.

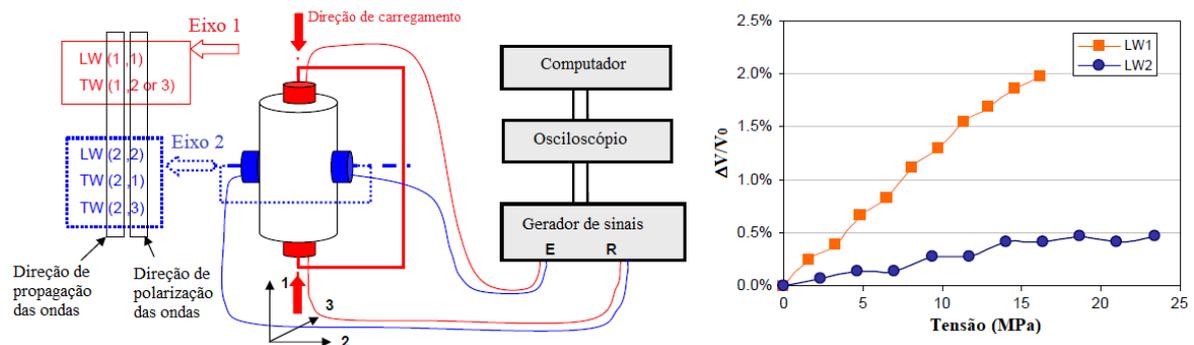
$$V_{ij}^\sigma = V_{ij}^0 (1 + A_{ij} \sigma_{11}) \quad \text{Equação 2.24}$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = A_{ij} \sigma \quad \text{Equação 2.25}$$

Quanto aos ensaios para avaliação do efeito acustoelástico, desde a definição da teoria da acustoelasticidade, diversas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de avaliar o efeito acustoelástico em diferentes tipos de materiais. Lillamand *et al.* (2010) avaliou o nível de tensão em corpos de prova de concreto através da velocidade de pulso ultrassônico por meio da teoria da acustoelasticidade. Quanto ao efeito acustoelástico, os autores observaram uma maior sensibilidade das ondas longitudinais propagadas na mesma direção da tensão, e

para baixos níveis de tensão obtiveram uma relação linear entre a variação da velocidade de propagação e o nível de tensão aplicado nos elementos, conforme a Figura 2.6.

Figura 2.6 – Ensaio acustoelástico em corpo de prova de concreto



Fonte: Adaptada de Lillamand et al. (2010).

Nogueira (2017) realizou uma avaliação ultrassônica dos parâmetros acustoelásticos em elementos de alumínio. Medidas das velocidades longitudinais e de cisalhamento foram realizadas em corpos de prova prismáticos de alumínio sob tensões de até aproximadamente 60% da tensão de escoamento do material. Uma relação linear da variação da velocidade com o acréscimo de tensão possibilitou a obtenção das constantes de Murnaghan (1937), que indicaram uma redução da velocidade longitudinal propagada na direção transversal à aplicação da tensão, ao passo que velocidades de cisalhamento polarizadas na direção do carregamento sofreram acréscimos conforme aumento do nível de tensão.

No Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (SET – EESC/USP), importantes avanços na compreensão do efeito acustoelástico foram obtidos a partir da avaliação de elementos de concreto simples nos trabalhos desenvolvidos por Schiavon (2015), Resende (2018) e Bompan (2021) e nos elementos de alvenaria estrutural formados por blocos de concreto em trabalho desenvolvido por Gondim (2022). Nestes trabalhos, por exemplo, verificou-se que: (i) ondas propagadas na mesma direção da aplicação de tensão são mais sensíveis ao efeito acustoelástico, (ii) concretos menos resistentes e mais deformáveis apresentam maior variação relativa de velocidade para um mesmo nível de tensão, (iii) a aplicação de ciclos de carregamento favorece a estabilização da curva acustoelástica e a análise do nível de tensão, (iv) o efeito acustoelástico foi mais pronunciado nas medições realizadas através de medidas indiretas, (v) ainda que o nível de danificação dos corpos de prova possua influência significativa no efeito, propiciando um comportamento inicial não linear da curva acustoelástica.

2.4 APLICAÇÃO DO ULTRASSOM NA ALVENARIA

De acordo com Schuller (2003), o método da velocidade de pulso ultrassônico foi aplicado pela primeira vez na alvenaria em 1967 durante a investigação de elementos de paredes. Desde então, as técnicas não destrutivas ultrassônicas têm sido utilizadas na avaliação de construções existentes, localização de vazios, fissuras, danos e, mais recentemente, em aplicações que incluem a verificação de falhas em juntas de argamassa e controle de qualidade durante os procedimentos de injeção de graute.

Embora o método ultrassônico possa ser empregado com certa facilidade e agilidade, McCann e Forde (2001) alertam para a dificuldade na medição de grandes elementos de alvenaria em decorrência da atenuação da energia do pulso ultrassônico na interface entre os blocos de alvenaria e a junta de argamassa, sendo este método mais adequado para análise de unidades isoladas do material. Além disso, os mesmos autores comentam que dificuldades como o acoplamento dos transdutores devido à porosidade superficial do bloco e a variabilidade dos resultados devido à heterogeneidade do material podem dificultar o emprego do ultrassom na alvenaria.

Figura 2.7 – Aplicação do ultrassom em parede de alvenaria



Fonte: Sklodowski (2008).

Tais possibilidades e limitações foram sendo tratadas ao longo dos anos em diferentes tipos de situações, empregando distintos materiais e elementos estruturais. No que diz respeito às condições de ensaio, uma grande parte dos trabalhos foram desenvolvidos em elementos isolados fabricados com cerâmica, concreto, calcário, granito, etc., com vista à caracterização desses materiais. Entretanto, também é recorrente o emprego do ultrassom na avaliação *in situ* de estruturas de cunho histórico, tendo como objetivo à realização de um diagnóstico acerca

do estado de preservação das mesmas. Além disso, embora em menor escala, ensaios laboratoriais com ultrassom também têm sido realizados em elementos estruturais carregados, com o intuito de avaliar a influência do carregamento em resultados de velocidade de pulso ultrassônico, dedicando-se ou não à investigação exclusiva do efeito acustoelástico nestes elementos.

Diante da variabilidade de condições de ensaio, materiais e elementos utilizados para análise ultrassônica, realizou-se uma revisão bibliográfica com o intuito de identificar as principais lacunas e aplicações a respeito do tema. Dessa maneira, inicialmente definiu-se uma estratégia de busca baseada nos principais termos inerentes ao tema, por sua vez já observados em publicações notadamente conhecidas anteriormente, utilizando os operadores booleanos (*and* e *or*) durante a estratégia de busca para a filtragem de trabalhos relacionados ao tema. Toda a pesquisa foi realizada na base de dados Scopus, tendo como tempo limite superior o ano de 2022.

De maneira geral, foram realizadas duas buscas utilizando uma combinação de termos, usualmente conhecidas como *strings*, a serem identificadas no título ou nas palavras-chave dos trabalhos publicados e indexados naquela base de dados. Dessa forma, a primeira busca foi realizada com o objetivo de identificar trabalhos com aplicações gerais do ultrassom em elementos de alvenaria e a segunda busca foi refinada procurando identificar apenas os trabalhos que avaliaram os elementos de alvenaria por ensaios ultrassônicos, simultaneamente a aplicação de algum nível de carregamento. Ambas as *strings* de busca estão descritas abaixo.

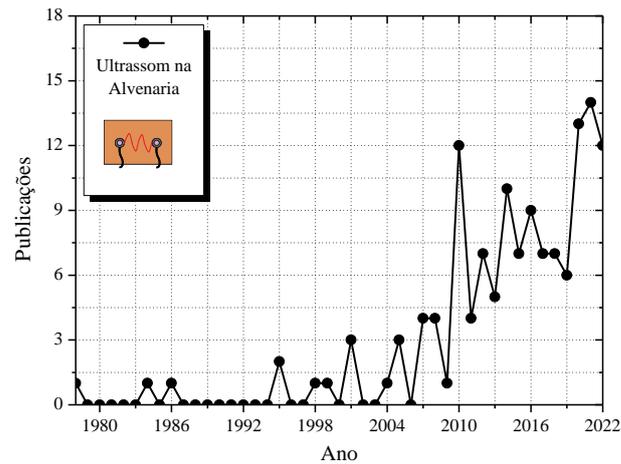
- a) *String 1: (Masonry or Masonries or Brick) and (Ultrasonic or Ultrasound or UPV);*
- b) *String 2: (Masonry or Masonries or Brick) and (Ultrasonic or Ultrasound or UPV) and (Acoustoelasticity or Acoustoelastic or Load or Stress).*

Após a efetuação das buscas, uma análise foi realizada com o intuito de selecionar apenas os trabalhos inerentes ao tema e descartar os trabalhos que, embora fossem contemplados pelas *strings* acima, não estavam diretamente ligados à avaliação ultrassônica de elementos de alvenaria.

Posteriormente à realização da primeira busca, 324 trabalhos foram identificados e 136 selecionados com base na ligação com o tema. A Figura 2.8 apresenta a evolução do número de publicações ao longo do tempo, segundo levantamento realizado apenas com os trabalhos selecionados. De maneira geral, observa-se que a aplicação do ultrassom nos elementos de alvenaria foi realizada de maneira pontual em trabalhos específicos durante muitos anos, mas que nas duas últimas décadas houve uma intensificação dessas publicações. Este fato deve-se

basicamente à própria difusão dos ensaios ultrassônicos para aplicação em estruturas civis e também à crescente preocupação de alguns países europeus com a avaliação e diagnóstico de estruturas ligadas ao patrimônio histórico e urbanístico da região, onde se utilizam de técnicas não invasivas como o ultrassom para identificação de danos significativos à estrutura a fim de contribuir com uma posterior restauração da mesma.

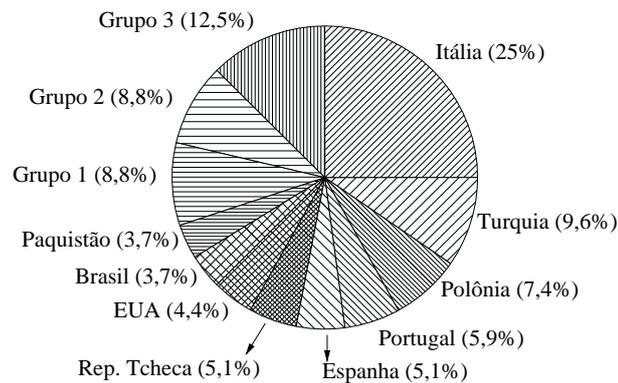
Figura 2.8 – Evolução do número de publicações sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria conforme a Scopus



Fonte: Autoria própria.

Dentre os países que mais se destacam com as publicações acerca do tema, quase 60% dos trabalhos selecionados foram desenvolvidos por pesquisadores de apenas seis países europeus, nomeadamente Itália, Turquia, Polônia, Portugal, Espanha e República Tcheca, com grande destaque para a Itália, responsável por $\frac{1}{4}$ de todas as publicações, como apresentado na Figura 2.9. Historicamente, a Europa conta com escolas tradicionais que realizam diversas pesquisas em alvenaria que auxiliam na divulgação e amplificação do uso deste sistema estrutural em diversos outros países. Alguns pesquisadores também ratificam que grande parte das construções comerciais e residenciais urbanas de diversos países europeus são em alvenaria, ocasionando em um uso em larga escala do sistema no continente (Stepinac *et al.*, 2020; Marques e Lourenço, 2019). Esta tendência foi sendo replicada ao longo dos anos em virtude de diversos fatores, como a escassez de materiais de construção após a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), a implantação de programas governamentais para construção de edifícios populares nos anos 50 e início dos anos 60, além da publicação de normas pioneiras destinadas ao projeto de elementos de alvenaria, como o CP 111 em 1948 e a BS 5628 em 1978, como descrito por Hendry (2002). Naturalmente, o encadeamento de todos esses fatores favoreceu um acréscimo significativo ao longo do tempo do número de pesquisas dedicadas ao sistema.

Figura 2.9 – Histórico de países com publicações sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria



Grupo 1: Países com apenas quatro publicações (China, Índia e Reino Unido)

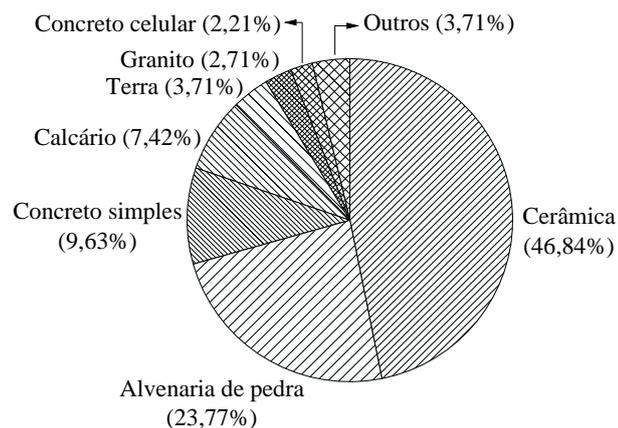
Grupo 2: Países com apenas três publicações (Egito, Grécia, Irã e Japão)

Grupo 3: Países com até duas publicações: (Alemanha, Austrália, Bélgica, Canadá, Escócia, Eslovênia, Finlândia, França, Iraque, Israel, Malásia, Rússia, Tunísia e Vietnã)

Fonte: Autoria própria.

Quanto aos materiais utilizados, a Figura 2.10 apresenta o histórico dos principais materiais empregados nas publicações analisadas. Neste ponto, quase metade dos trabalhos analisados foram desenvolvidos em elementos produzidos com material cerâmico, o que justifica que 53,3% das publicações selecionadas foram realizadas a partir da avaliação ultrassônica de tijolos cerâmicos, por sua vez largamente empregados em edificações históricas e com baixa altura, recorrentes na Europa por conta do potencial sísmico de algumas regiões do continente (Marques e Lourenço, 2019).

Figura 2.10 – Histórico de materiais empregados em publicações sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria



Outros: Materiais com até duas ocorrências (Grafite, geopolímero, sílica e solo-cimento)

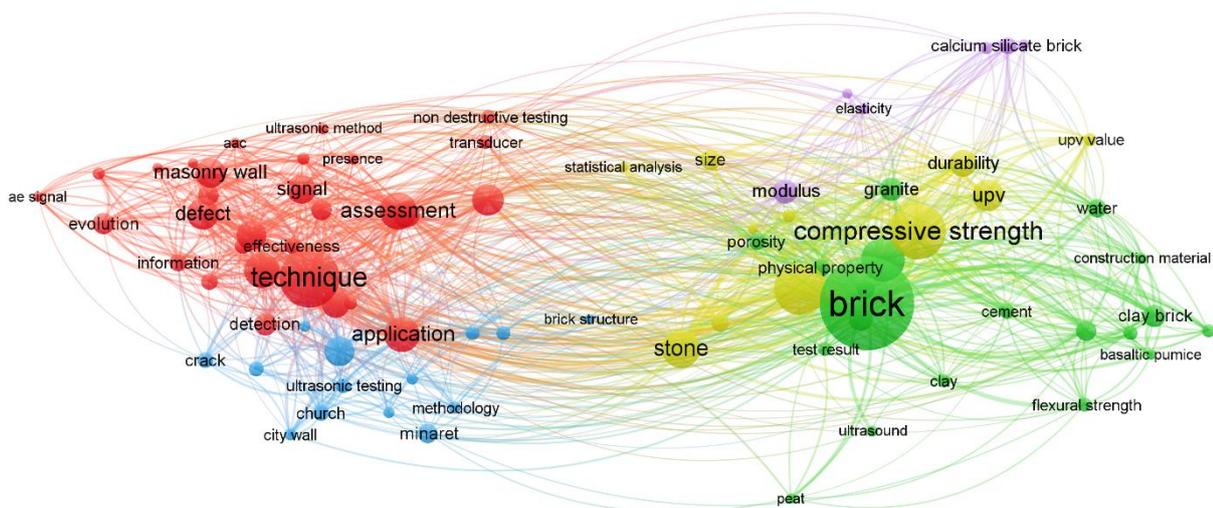
Fonte: Autoria própria.

Neste mesmo sentido, observou-se que apenas 9,6% dos trabalhos aplicaram o ultrassom em elementos de alvenaria produzidos com concreto simples, enquanto mais de 20% dos elementos eram de alvenaria de pedra. A alvenaria de pedra também ainda é bastante

utilizada no continente europeu através de diversos materiais derivados de minerais rochosos e neste levantamento observaram-se materiais como a dolomita, arenito, basalto e o mármore. Além da caracterização simples dessas unidades, diversos estudos também têm desenvolvido avaliações empregando o ultrassom na análise de estruturas históricas construídas com a alvenaria de pedra, como descrito em Orenday-Tapia *et al.* (2018) e Vasanelli *et al.* (2017). Do mesmo modo, materiais como o granito, concreto celular, calcário, grafite e solo-cimento também foram utilizados em algumas pesquisas.

A partir da coleta de dados anterior, os principais termos encontrados nos títulos, resumos e palavras-chave foram utilizados em uma análise bibliométrica com o *software* VOSviewer. Possibilitando a obtenção de uma rede bibliométrica qualitativa para visualização dos dados, como mostra a Figura 2.11. Com base na rede indicada, verificou-se que a maioria dos trabalhos foram divididos em duas principais linhas de pesquisa, a caracterização (à direita da rede) e o diagnóstico (à esquerda da rede).

Figura 2.11 – Rede bibliométrica de dados sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria



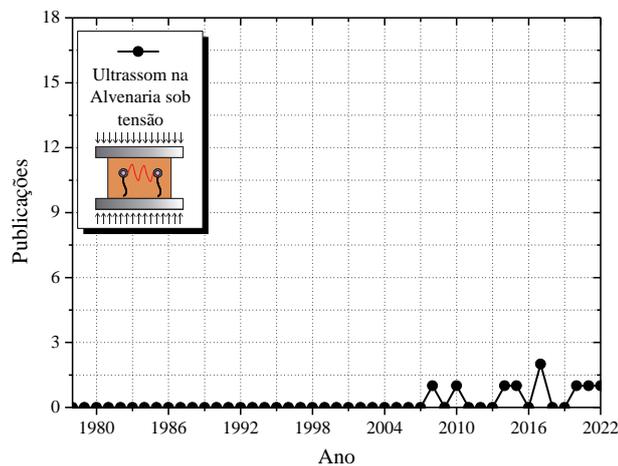
Fonte: Autoria própria.

No que tange à caracterização dos elementos, pôde-se notar a indicação para muitos estudos dedicados à caracterização de tijolos de diferentes materiais empregando o ultrassom, e relacionando tais resultados com diversas propriedades físico-mecânicas e de durabilidade destas unidades, tais como a resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade, porosidade e absorção de água. Por outro lado, o levantamento indicou que boa parte dos trabalhos se dedicaram à aplicação das técnicas não destrutivas ultrassônicas para o diagnóstico e detecção de defeitos em paredes de alvenaria, com o intuito de realizar a identificação principalmente de fissuras e vazios, interligados com pesquisas aplicadas ao contexto do patrimônio histórico de torres e igrejas (Figura 2.11).

Ademais, de todos os documentos analisados, verificou-se que apenas 3,0% dos trabalhos aplicaram o ultrassom em elementos de alvenaria produzidos por blocos vazados, o que configura uma lacuna nesta área do conhecimento e justifica-se pela maior dificuldade de avaliação não destrutiva por conta da presença dos vazios na seção transversal, bem como pela maior variação de resultados entre as diferentes direções. Além disso, a baixa quantidade de estudos com elementos vazados apresenta-se de maneira contrária à prática brasileira, que os emprega em larga escala em materiais cerâmicos e de concreto (Corrêa, 2012).

No que se refere às publicações ligadas à avaliação ultrassônica em elementos de alvenaria sob tensão, é notável a grande escassez de trabalhos nesta temática, visto que apenas um número pequeno de trabalhos isolados nos últimos anos tem realizado este tipo de investigação. Após a segunda busca de resultados, 39 trabalhos foram identificados inicialmente e apenas sete deles foram selecionados, como indicado na Figura 2.12. Cabe mencionar que diante das publicações apresentadas para elementos sob tensão, um número mais reduzido ainda se ateu à análise específica do efeito acustoelástico. Neste ponto, acrescenta-se que outras duas publicações notadamente reconhecidas sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria sob tensão foram incorporadas aos dados, embora não estejam indexadas na base de dados Scopus.

Figura 2.12 – Evolução do número de publicações sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria sob tensão conforme a Scopus*



Fonte: Autoria própria.

De maneira específica, a Tabela 2.3 apresenta a descrição dos nove trabalhos encontrados sobre este tópico. Inicialmente, verificou-se que os trabalhos dedicados à avaliação ultrassônica de elementos carregados tinham como objetivo analisar, de maneira geral, a influência do carregamento na velocidade de pulso ultrassônica em diversos materiais, como o granito, cerâmica e o calcário, não avaliando de forma direta o efeito acustoelástico. Além disso, notou-se uma quase totalidade de pesquisas utilizando as unidades maciças para a

* Os trabalhos publicados em 2014 e 2022 não estão indexados na base de dados Scopus.

produção dos elementos a serem avaliados. Neste mesmo contexto, apenas os trabalhos de Jasiński (2020), Jasiński *et al.* (2021) e Gondim (2022), publicados nos últimos três anos, foram específicos e se preocuparam com a avaliação do fenômeno da acustoelasticidade, o que torna esta área de pesquisa ainda recente e restrita à utilização das unidades em concreto.

Tabela 2.3 – Relação de trabalhos sobre a aplicação do ultrassom na alvenaria sob tensão

Autor (Ano)	Unidades	Elemento avaliado	Material utilizado
Vasconcelos <i>et al.</i> (2008)	Maciças	Tijolos	Granito
Khodaverdian e Shomali (2010)	Maciças	Paredes	Cerâmica
Manning <i>et al.</i> (2014)	Maciças	Paredes	Granito
Monteagudo (2015)	Maciças	Paredes	Cerâmica
Vasanelli <i>et al.</i> (2017)	Maciças	Tijolos	Calcário
Brozovsky (2017)	Maciças	Tijolos	Sílico-calcário
Jasiński (2020)	Maciças	Prismas	Concreto celular
Jasiński <i>et al.</i> (2021)	Maciças	Prismas	Concreto celular
Gondim (2022)	Vazadas	Blocos, prismas e paredes	Concreto simples

Fonte: Autoria própria.

De posse das informações levantadas anteriormente, observou-se que diversas pesquisas foram realizadas nos últimos anos englobando a caracterização e o diagnóstico dos elementos de alvenaria através dos ensaios ultrassônicos, em diferentes situações que envolviam ou não a aplicação simultânea de cargas. Neste sentido, alguns dos principais trabalhos serão especificados e descritos de maneira mais detalhada nos próximos itens deste capítulo.

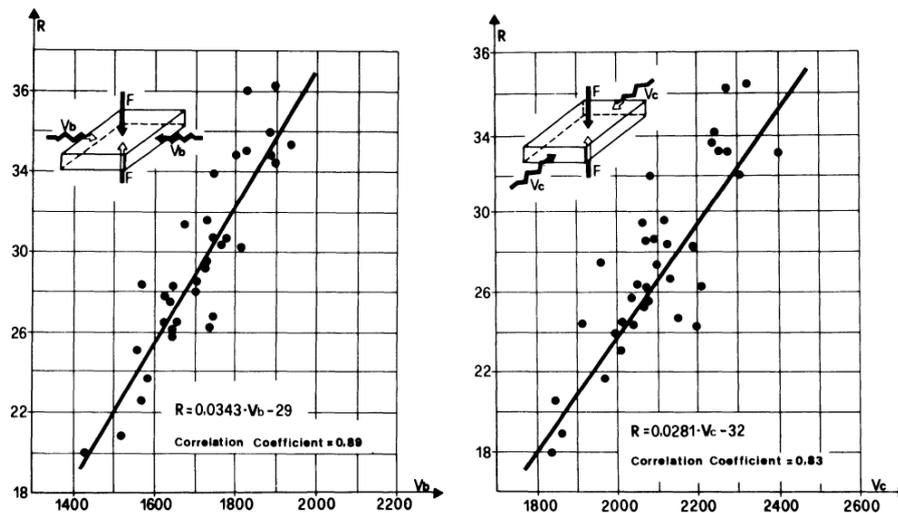
2.4.1 Caracterização de materiais

Do ponto de vista de caracterização dos materiais utilizados na alvenaria, uma grande gama de trabalhos dedicou-se à realização ultrassônica em tijolos de alvenaria com o objetivo de identificar a variação das propriedades do material conforme a direção analisada, bem como realizar a obtenção de possíveis correlações empíricas ligando a velocidade de pulso ultrassônico e as propriedades dinâmicas do material com as demais propriedades físico-mecânicas obtidas através dos ensaios tradicionais, tais como a absorção de água, porosidade, densidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade estático.

Neste sentido, Olivito (1990) realizou uma série de ensaios ultrassônicos em tijolos cerâmicos utilizando transdutores com frequência de 150 kHz a 1 MHz com o intuito de caracterizar a VPU dessas unidades ao longo das duas direções perpendiculares à direção de

aplicação do carregamento e relacionar estas propriedades com a resistência à compressão dos mesmos tijolos. Para ambas as velocidades, observou-se uma proximidade entre as velocidades dos tijolos na direção da largura e do comprimento, proporcionando a obtenção de relações razoáveis entre a resistência à compressão (R) e a velocidade de pulso ultrassônico (V_b ou V_c), conforme mostra a Figura 2.13.

Figura 2.13 – Relação entre a resistência à compressão e a velocidade de pulso ultrassônico



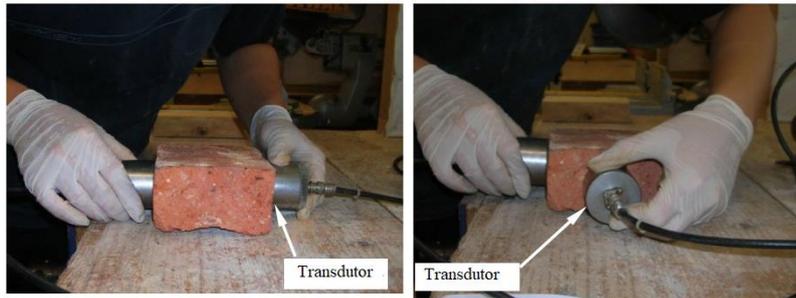
Fonte: Olivito (1990).

Em pesquisa realizada com o mesmo objetivo, Brozovsky e Zach (2007) utilizaram os ensaios ultrassônicos não destrutivos para avaliar possíveis correlações entre a VPU e a resistência à compressão de tijolos cerâmicos. Os testes não destrutivos foram aplicados através de medidas diretas e indiretas em tijolos antigos e novos. De acordo com os autores, com a utilização de medidas diretas realizadas ao longo do comprimento dos tijolos, uma relação definida pela Equação 2.26 foi obtida, apresentando um coeficiente de determinação de 0,898. Apesar da boa relação, os autores esclarecem que a aplicação do ultrassom para este tipo de previsão é discutível, tendo em vista a grande influência do processo de fabricação dos tijolos.

$$f_b = -4,5749(VPU)^2 + 38,277(VPU) - 33,988 \quad \text{Equação 2.26}$$

Em trabalho similar, Dizhur *et al.* (2017) empregou o método da velocidade de pulso ultrassônico para realizar a caracterização de tijolos cerâmicos através de medições realizadas pelo método direto e semidireto, conforme ilustra a Figura 2.14. Neste caso, nenhuma relação foi encontrada pelos autores utilizando o método de transmissão semidireto e relações ruins foram obtidas pelo método direto, tendo em vista que apresentaram coeficientes de determinação da ordem de 0,25.

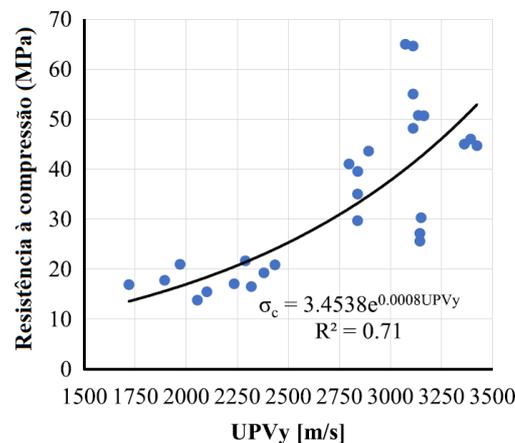
Figura 2.14 – Realização de ensaios ultrassônicos pelo método direto e semidireto



Fonte: Adaptada de Dizhur *et al.* (2017).

Noor-E-Khuda e Albermani (2019) realizaram uma série de ensaios destrutivos e não destrutivos em tijolos cerâmicos com diferentes geometrias que variavam entre as características químicas e de produção. Após a realização de ensaios ultrassônicos ao longo das três direções ortogonais e obter a resistência à compressão de todas as unidades cerâmicas através dos ensaios destrutivos, os autores indicaram que a correlação obtida entre a velocidade de pulso ultrassônico medida na direção da altura dos tijolos e a resistência à compressão dos mesmos pode ser dada pela equação expressa na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Relação entre resistência à compressão e VPU



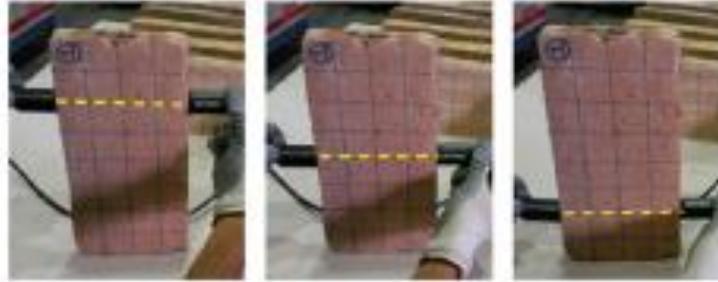
Fonte: Adaptada de Noor-E-Khuda (2019).

Os autores também utilizaram uma relação entre a velocidade máxima e mínima obtida nos tijolos para estimar o grau de anisotropia das unidades, obtendo valores que foram de 30% a 50%. Dessa forma, houve uma grande diferença entre as velocidades obtidas em cada uma das direções.

Neste mesmo contexto, Makoond *et al.* (2020) realizou uma série de ensaios ultrassônicos em unidades maciças de alvenaria extraídas de edificações históricas, com o objetivo de obter relações entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico destes componentes. Os autores propuseram uma relação empírica entre ambas as propriedades, embora esta tenha sido significativamente influenciada como a heterogeneidade e composição

química das diferentes unidades (Figura 2.16).

Figura 2.16 – Ensaio ultrassônico em tijolos cerâmicos

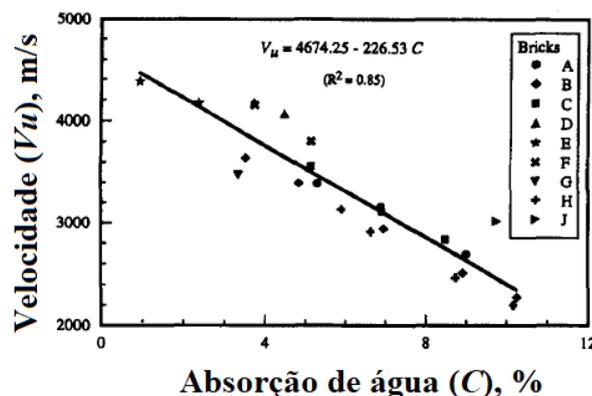


Fonte: Makoond *et al.* (2020).

Além da aplicação em materiais cerâmicos, os ensaios ultrassônicos também foram bastante empregados na caracterização de tijolos de concreto, através dos ensaios realizados em Jasiński *et al.* (2019) e Sajid *et al.* (2018), bem como na avaliação de tijolos de calcário por Concu *et al.* (2014), de tijolos de terra estabilizada por meio dos ensaios desenvolvidos por Kasinikota *et al.* (2022) e em tijolos de granito para emprego na alvenaria, como apresentado por Vasconcelos *et al.* (2008). Neste sentido, observa-se a vasta possibilidade de aplicação das técnicas não destrutivas ultrassônicas na caracterização das unidades de alvenaria.

Em Koroth *et al.* (1998), os ensaios não destrutivos ultrassônicos foram utilizados para obter relações com as propriedades físicas do material. Neste sentido, os autores observaram uma relação indireta entre a absorção de água e a velocidade de pulso ultrassônico, como ilustra a Figura 2.17. A relação com as propriedades físicas também foi realizada em Özkan e Yayla (2016) e Kasinikota (2022) que também indicaram uma redução na VPU conforme aumento da absorção de água e porosidade das unidades de alvenaria, bem como a partir da diminuição da densidade das mesmas.

Figura 2.17 – Relação entre absorção de água e VPU

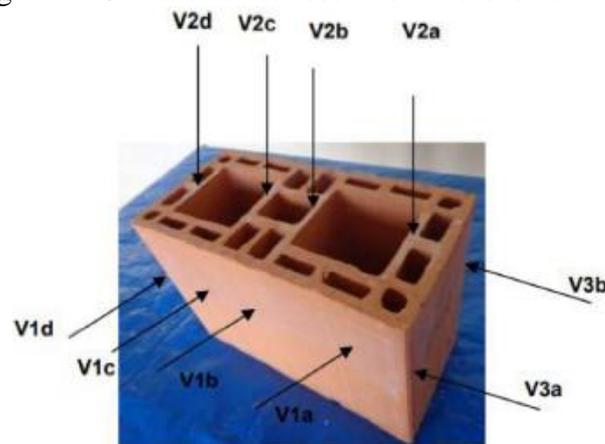


Fonte: Adaptada de Koroth *et al.* (1998).

No que diz respeito às unidades vazadas de alvenaria estrutural que são comumente empregadas no país, Marvila *et al.* (2019) e Sombra (2020) aplicaram o método de velocidade

de pulso ultrassônico para caracterizar unidades cerâmicas e de concreto, obtendo relações interessantes com propriedades físico-mecânicas como a resistência à compressão e absorção de água do material. Do ponto de vista metodológico, Marvila *et al.* (2019) realizou as mediações tomando apenas o ponto médio em cada uma das faces longitudinais e laterais, conforme ilustrado na Figura 2.18. Por outro lado, Sombra (2020) realizou o mapeamento da velocidade de propagação ultrassônica ao longo de diferentes pontos divididos em cada uma das faces superficiais do corpo de prova.

Figura 2.18 – Ensaio ultrassônico em bloco cerâmico



Fonte: Marvila *et al.* (2019).

Além da aplicação do ultrassom na caracterização de unidades de alvenaria, alguns trabalhos realizaram a avaliação de estruturas *in situ* com a utilização do método de velocidade de pulso ultrassônico. Dentre outros, Sklodowski (2008) empregou o ultrassom através das ondas Rayleigh de superfície para realizar o monitoramento da homogeneidade de painéis de alvenaria, conforme a Figura 2.19. Desse modo, a partir da VPU em diferentes regiões dos elementos avaliados, foi possível observar a possível homogeneidade das propriedades da alvenaria, bem como a necessidade de reparo.

Figura 2.19 – Aplicação do ultrassom em alvenaria *in situ*



Fonte: Sklodowski (2008).

2.4.2 Diagnóstico e identificação de defeitos

Conforme relatado anteriormente no levantamento de dados bibliográficos, uma outra grande linha de pesquisa em ensaios não destrutivos ultrassônicos aplicados à alvenaria diz respeito aos testes realizados com o objetivo de efetuar um diagnóstico dos materiais e elementos de alvenaria. Neste sentido, tem-se observado trabalhos técnicos visando analisar a qualidade dos materiais, assim como aplicar a técnica ultrassônica na realização de imagens tomográficas para identificação e detecção de defeitos nos elementos de alvenaria.

Em Dilek (2007), os ensaios ultrassônicos foram aplicados para avaliar a baixa qualidade das juntas de argamassa em paredes de alvenaria histórica para uma posterior restauração (Figura 2.20). Neste sentido, o autor descreve que a partir dos resultados de velocidade de pulso ultrassônico obtidos em diferentes regiões do elemento estrutural, é possível identificar as possíveis fiadas em que as juntas apresentam problemas, uma vez que tais defeitos promovem uma atenuação e redução na VPU das ondas ultrassônicas.

Figura 2.20 – Aplicação do ultrassom em parede de alvenaria

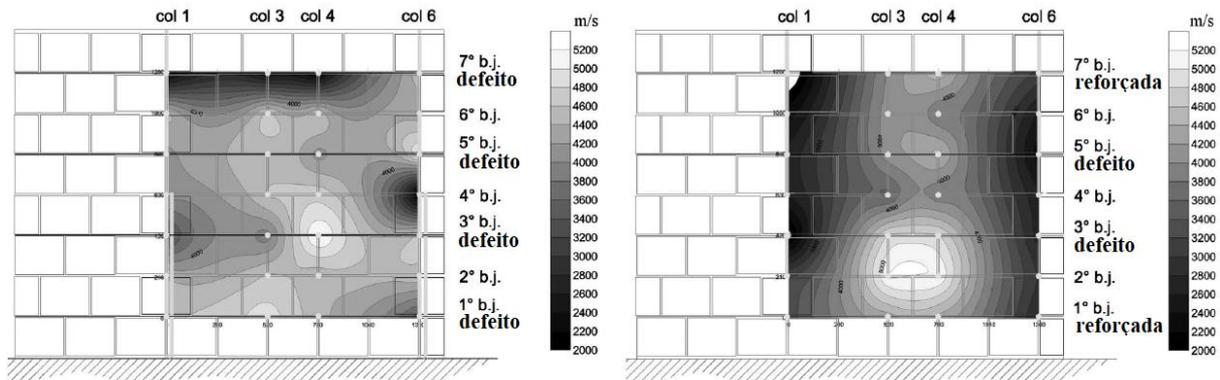


Fonte: Dilek (2007).

O controle de qualidade de elementos de alvenaria de concreto reforçados também foi realizado por meio da velocidade em ensaios experimentais desenvolvidos por Arosio *et al.* (2012), entretanto, agora utilizando ensaios de vibração sônicos. No mesmo contexto descrito por Dilek (2007), este trabalho procurou realizar o monitoramento da velocidade sônica em diferentes painéis de alvenaria reforçados com o objetivo de identificar o impacto dos defeitos nas juntas, originados pelos vazios que surgem pelo mal preenchimento das mesmas. Assim, os autores comentaram que a velocidade média nas juntas sem defeito foi de aproximadamente 4400 m/s, ao passo que as medidas realizadas na região das juntas defeituosas apresentaram resultados de aproximadamente 2300 m/s, conforme a Figura 2.21.

Embora tenha sido realizada a avaliação da velocidade sônica nos painéis, os autores comentaram a dificuldade na detecção do reforço e das próprias juntas com defeito.

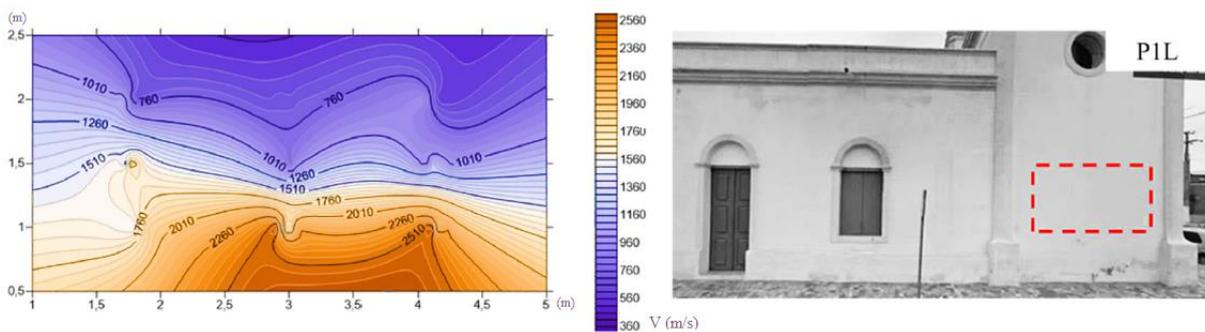
Figura 2.21 – Variação da velocidade sônica em paredes de alvenaria com juntas defeituosas e reforçadas



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

Mesquita *et al.* (2018) utilizou os testes não destrutivos para caracterizar as velocidades ultrassônicas de diversos painéis externos de alvenaria situados em edificações históricas do século XVIII. A metodologia adotada utilizou-se das medidas de transmissão indireta para obtenção da velocidade de pulso ultrassônico ao longo de diferentes regiões da estrutura, obtendo resultados com baixa variação, e constatando a eficácia da técnica na identificação de heterogeneidades, conforme ilustra a Figura 2.22.

Figura 2.22 – Ensaio ultrassônico em painel de alvenaria



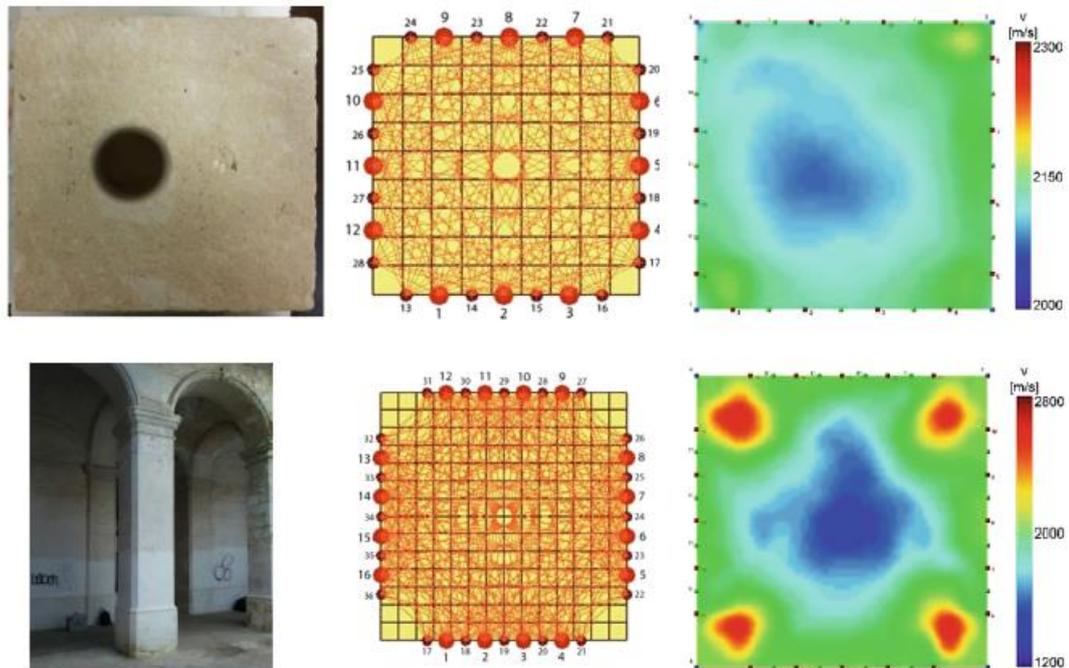
Fonte: Adaptada de Mesquita *et al.* (2018).

No Brasil, a ABNT NBR 16805:2020 discorre sobre a caracterização de painéis de alvenaria com unidades maciças através do método de velocidade de pulso ultrassônico, apresentando diretrizes quanto ao procedimento de ensaio com transmissão indireta, frequência e distância dos transdutores.

No que diz respeito à tomografia ultrassônica, Camassa *et al.* (2018) apresentou uma metodologia em que utiliza os testes ultrassônicos para geração de imagens tomográficas em construções históricas de alvenaria. Inicialmente a técnica foi validada experimentalmente em

um tijolo defeituoso de alvenaria para, posteriormente, ser aplicada na identificação de defeitos e heterogeneidades em pilares de construções históricas de alvenaria, como indicado na Figura 2.23, apresentando-se como uma alternativa razoável na identificação de tais problemas.

Figura 2.23 – Tomografia ultrassônica aplicada em tijolos e pilares de alvenaria



Fonte: Adaptada de Camassa *et al.* (2018).

Neste mesmo contexto, Zielińska e Rucka (2018) aplicaram os ensaios ultrassônicos para identificação de defeitos em pilares de alvenaria a partir da tomografia ultrassônica. No geral, quatro pilares de alvenaria foram construídos com tijolos cerâmicos e em três deles foi inserido uma falha, por sua vez proveniente de um vazio ou da presença de uma região grauteada com argamassas de gesso e de cimento, respectivamente, conforme ilustrado pela Figura 2.24.

Figura 2.24 – Pilares defeituosos de alvenaria para ensaio tomográfico

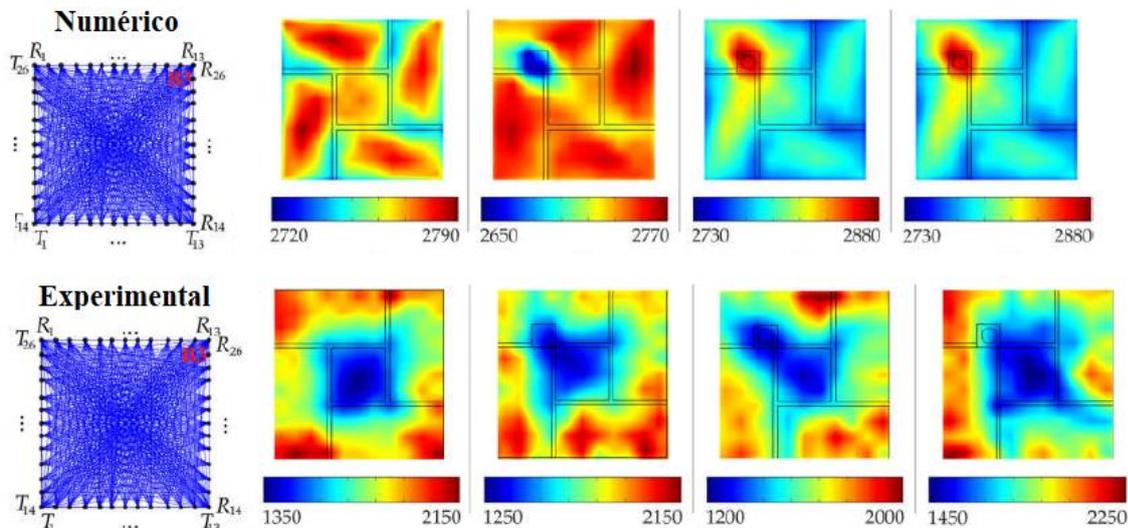


Fonte: Adaptada de Zielińska e Rucka (2018).

Para identificação dos defeitos, Zielińska e Rucka (2018) utilizaram avaliações

numéricas e experimentais para criação de tomogramas de velocidade ultrassônica, conforme mostra a Figura 2.25. Nas simulações numéricas foi possível realizar uma boa identificação dos defeitos, bem como o arranjo das juntas de argamassa. Por outro lado, tais observações não puderam ser realizadas com tanta clareza nos ensaios experimentais que passou a indicar largas zonas de baixa velocidade nas regiões de proximidade das juntas. Entretanto, os ensaios experimentais serviram indiretamente para mostrar a boa adesão entre os reforços grauteados pelas argamassas de gesso e cimento.

Figura 2.25 – Tomogramas obtidos para os diferentes pilares



Fonte: Adaptada de Zielińska e Rucka (2018).

2.4.3 Avaliação ultrassônica sob tensões

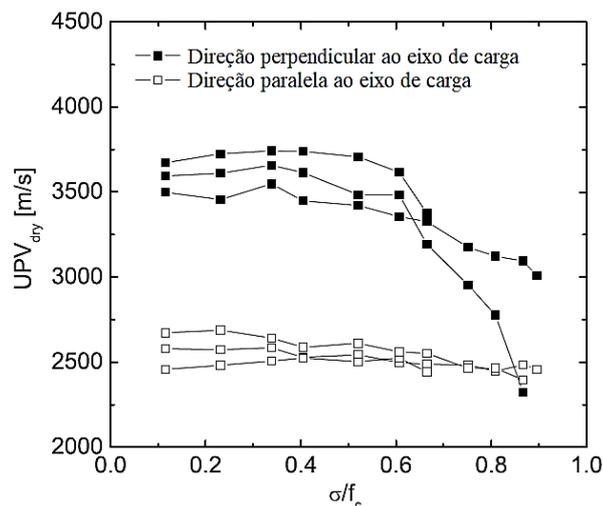
Embora a maioria dos trabalhos identificados fossem dedicados à aplicação do ultrassom em elementos de alvenaria livres de tensão, algumas pesquisas isoladas realizaram ensaios experimentais para identificar o efeito do carregamento na velocidade de pulso ultrassônico. Boa parte destes trabalhos não realizaram uma investigação específica a respeito do efeito acustoelástico em si, mas podem servir como base para entendimento da influência do carregamento na VPU.

Khodaverdian e Shomali (2010) realizaram ensaios ultrassônicos em seis pequenas paredes de tijolos cerâmicos com o objetivo de verificar o impacto do carregamento na velocidade de pulso ultrassônico medidos através de medidas indiretas. Para tal, as medidas ultrassônicas foram realizadas em três instantes correspondentes aos níveis de tensão relativos à resistência dos elementos, cujas forças aplicadas eram de 0, 200 e 400 kN, por sua vez correspondentes a 0, 0,34 f_p e 0,68 f_p . Embora o autor não tenha apresentado os valores numéricos para a variação relativa de velocidade, pelos dados de VPU apresentados observou-

se que houve uma elevação da VPU conforme aumento do carregamento aplicado. Para os valores médios apresentados, as velocidades medidas sob carregamentos de $0,68f_p$ foram até 4,4% maiores em relação àquelas nos elementos livres de tensão, com um coeficiente de variação igual a 8,0%.

Vasconcelos *et al.* (2008) realizou o monitoramento da VPU em tijolos de granito para uso na alvenaria simultaneamente a aplicação do carregamento. De maneira geral, conforme ilustrado pela Figura 2.26, não foi possível perceber uma tendência clara de diminuição ou elevação da variação relativa de velocidade até a aplicação de carga referente à 40% da resistência do material. Entretanto, para maiores valores de tensão aplicada, houve uma redução considerável na VPU, uma vez que o nível de danificação do material nestas situações era elevado.

Figura 2.26 – Variação da VPU com o nível de tensão aplicado em tijolos de granito



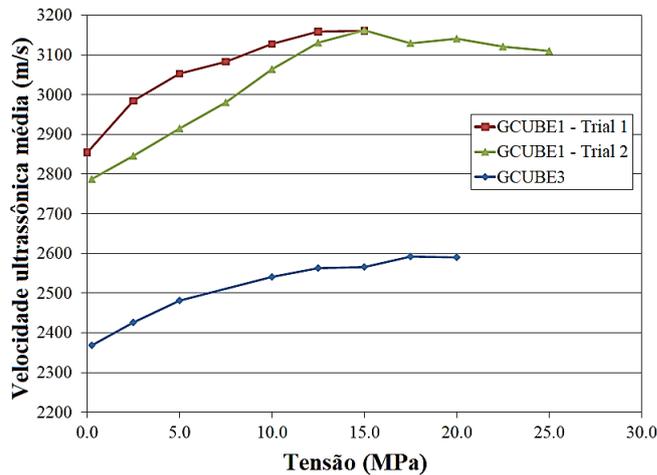
Fonte: Adaptada de Vasconcelos *et al.* (2008).

Uma outra análise utilizando os tijolos de granito foi realizada em Manning *et al.* (2014), onde tijolos cúbicos de granito com resistência à compressão de aproximadamente 67,9 MPa foram submetidos a ensaios ultrassônicos simultaneamente à aplicação de carga. Neste caso, houveram significativas elevações na VPU conforme aumento da tensão aplicada e para níveis de tensão correspondentes a 30% de sua resistência à compressão, observou-se variações de velocidade de aproximadamente 9,2% em relação à velocidade inicial de tijolos sem tensão aplicada, conforme a Figura 2.27.

Em trabalho similar, Vasanelli *et al.* (2017) realizou medidas ultrassônicas em tijolos de calcário, de maneira simultânea a aplicação de carregamento de compressão. As medidas foram realizadas utilizando transdutores de três frequências diferentes (1000, 120 e 55 kHz) nas direções perpendiculares à aplicação do carregamento (x e z) e os resultados indicaram

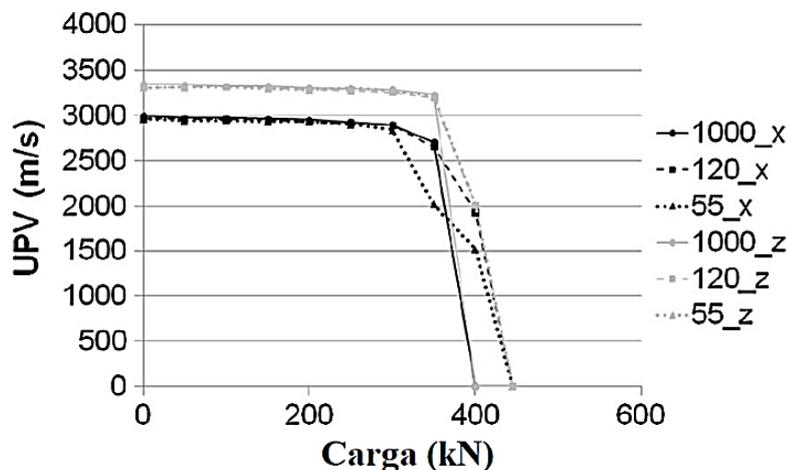
uma tendência de redução da VPU conforme aumento da tensão aplicada para níveis de tensão de 75% a 90%, quando a velocidade passou a reduzir de maneira significativa por conta do surgimento de fissuras no material, conforme a Figura 2.28. Estas reduções foram de aproximadamente 2% em relação à velocidade inicial para o elemento sem tensão.

Figura 2.27 – Variação da VPU com o nível de tensão aplicado em tijolos de granito



Fonte: Adaptada de Manning *et al.* (2014).

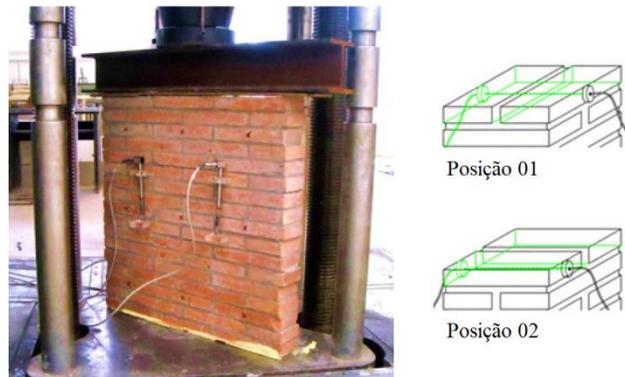
Figura 2.28 – Variação da VPU com o nível de tensão aplicado em tijolos de calcário



Fonte: Adaptada de Vasanelli *et al.* (2017).

Demais pesquisas no contexto geral de monitoramento da VPU em elementos submetidos à carregamentos uniaxiais foram realizadas por Brozovsky (2017) em tijolos de silicato de cálcio, onde foi possível notar uma redução da VPU para níveis de tensão aplicados de até 60% da resistência última, e também por Monteagudo *et al.* (2015) que avaliou paredes e pilares de alvenaria construídas com tijolos cerâmicos, conforme a Figura 2.29. Para este último trabalho, os autores perceberam um ligeiro aumento da UPV nos pilares e paredes antes da carga máxima de ruptura, ou seja, para um elevado nível de tensão.

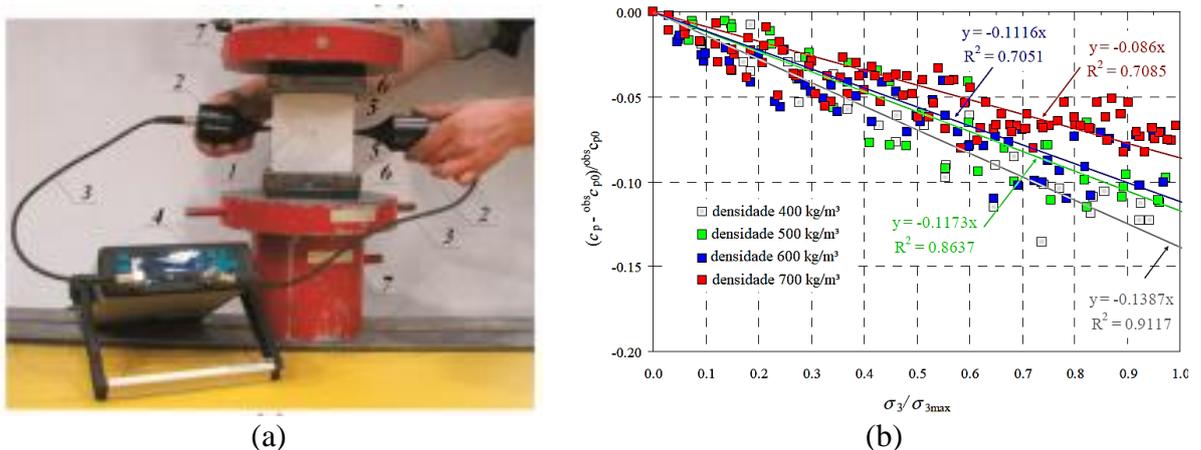
Figura 2.29 – Monitoramento da VPU em parede de tijolos sob tensão



Fonte: Adaptada de Monteagudo *et al.* (2015).

Em pesquisa mais direcionada de fato à avaliação do efeito acustoelástico, Jasiński (2020) realizou ensaios ultrassônicos em unidades maciças de alvenaria de concreto celular autoclavado. Os coeficientes acustoelásticos obtidos pelo pesquisador apresentaram variações consideráveis, entretanto, em uma estimativa do nível de tensão em prismas construídos com três unidades, a previsão das tensões mostrou-se com aproximação razoável para níveis de tensão aplicada abaixo de 50% da resistência à compressão dos prismas. Os ensaios foram realizados utilizando transdutores exponenciais com ondas propagadas na direção perpendicular à direção de aplicação do carregamento (Figura 2.30a). Ademais, por conta da variabilidade dos resultados, não foi possível identificar a formação de uma curva acustoelástica bem definida (Figura 2.30b).

Figura 2.30 – (a) Ensaio de acustoelasticidade e (b) curva acustoelástica de tijolos de concreto celular autoclavado



Fonte: Adaptada de Jasiński (2020).

Uma investigação do efeito acustoelástico também foi realizada por Gondim (2022) que avaliou o efeito em blocos, prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural formadas por blocos de concreto. Os ensaios foram realizados utilizando medidas diretas propagadas na

direção perpendicular à direção de aplicação do carregamento e polarizadas na mesma direção do carregamento, conforme a Figura 2.31.

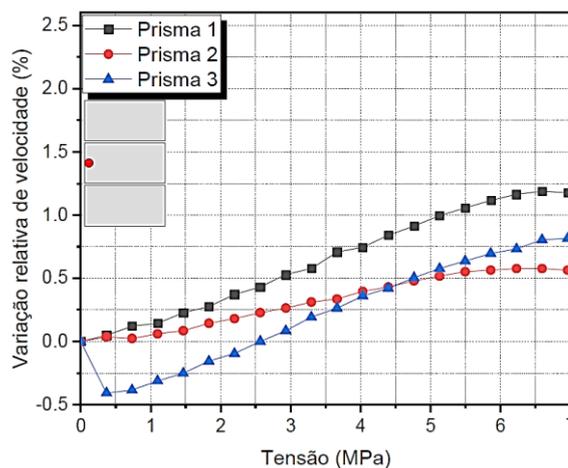
Figura 2.31 – Ensaio de acustoelasticidade em prisma de alvenaria estrutural



Fonte: Gondim (2022).

Durante a análise dos resultados obtidos, Gondim (2022) observou a presença do efeito acustoelástico nos elementos de alvenaria a partir do aumento da variação relativa de velocidade nos elementos de alvenaria, o que possibilitou a elaboração das curvas acustoelásticas (Figura 2.32). Além disso, para alguns elementos foi observar que a região inicial das curvas acustoelásticas apresenta uma não linearidade, por sua vez atribuída ao nível da danificação do material, que por sua vez se sobrepõe ao efeito acustoelástico e inicialmente ocasiona uma redução na VPU.

Figura 2.32 – Curvas acustoelásticas de prismas de alvenaria estrutural



Fonte: Gondim (2022).

2.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo realizou-se a apresentação e descrição de alguns dos principais trabalhos que empregaram o ultrassom para avaliação de elementos de alvenaria,

principalmente no que diz respeito à caracterização dos materiais, ao emprego da técnica do ensaio não destrutivo ultrassônico para a realização do diagnóstico e identificação de defeitos nos materiais e à influência do nível de tensão na velocidade de pulso ultrassônico.

Dessa forma, inicialmente realizou-se um levantamento bibliográfico com o objetivo de identificar os principais trabalhos na linha, bem como os possíveis campos de pesquisa. Durante este levantamento, notou-se uma quantidade considerável de pesquisas relacionadas à caracterização dos tijolos maciços para utilização na alvenaria, bem como o emprego das técnicas não destrutivas ultrassônicas para avaliação de estruturas de cunho histórico. Além disso, observou-se também um número bastante reduzido de trabalhos dedicados à avaliação ultrassônica em elementos sob tensão, bem como o emprego da VPU para avaliação de blocos vazados de alvenaria.

Em seguida, pesquisas referentes à caracterização dos materiais foram descritas, indicando o emprego do método da velocidade de pulso ultrassônico para avaliação de uma vasta quantidade de diferentes materiais e a possibilidade da obtenção de relações da VPU com as propriedades físico-mecânicas destas unidades. Além disso, pesquisas dedicadas ao diagnóstico de elementos de alvenaria foram desenvolvidas com o objetivo de realizar a avaliação da qualidade dos materiais, bem como a identificação de defeitos por meio da tomografia ultrassônica.

Finalmente, alguns dos principais trabalhos em que a avaliação ultrassônica foi realizada em elementos sob tensão foram apresentados, onde pôde-se verificar uma variabilidade muito grande nos resultados entre as pesquisas, bem como a influência da tensão na velocidade de pulso ultrassônico.

3 CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO ULTRASSÔNICA SEM TENSÃO: BLOCOS CERÂMICOS

Neste capítulo foi descrita a primeira etapa do programa experimental desenvolvido no trabalho, que consistiu na caracterização e avaliação ultrassônica em blocos cerâmicos livres de tensão. De maneira geral, realizou-se a caracterização físico-mecânica dos blocos empregados nesta pesquisa, por sua vez avaliados quanto às suas propriedades geométricas, físicas e mecânicas, possibilitando a obtenção das dimensões efetivas da amostra, absorção de água normal e por capilaridade, porosidade, densidades aparente e específica, bem como a sua resistência à compressão e módulo de elasticidade estático.

Além disso, os ensaios não destrutivos ultrassônicos foram empregados para realização do mapeamento da velocidade de pulso ultrassônico em cada uma das unidades, possibilitando uma avaliação da variação da VPU entre as diferentes direções ortogonais das unidades cerâmicas, assim como a obtenção de relações empíricas entre tais velocidades e as principais propriedades físico-mecânicas mencionadas anteriormente.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesta pesquisa foram utilizados blocos inteiros de material cerâmico, com comprimento de 290 mm, espessura nominal igual a 140 mm e altura de 190 mm. Dado o uso crescente das unidades cerâmicas com maior resistência e geometria mais robusta no Brasil, e a necessidade no emprego de elementos com geometria que possibilitasse a adequada propagação de ondas ultrassônicas com comprimento de onda compatível com os materiais e equipamentos disponíveis, empregaram-se blocos cerâmicos com paredes maciças e septos vazados na região interna da unidade, conforme a Figura 3.1.

Figura 3.1 – Bloco cerâmico com paredes maciças



Fonte: Autoria própria.

Todas as unidades foram fornecidas pela Cerâmica City e passaram pelo processo de inspeção visual no instante de recebimento para detecção de unidades com defeitos sistemáticos, como fissuras, superfícies irregulares e deformações excessivas que inviabilizariam a sua utilização, conforme recomendação da ABNT NBR 15270-1:2017.

Os blocos empregados foram divididos em três diferentes séries, conforme a variação da resistência média à compressão indicada de 8, 10 e 12 MPa na área bruta. Na Tabela 3.1 são apresentadas as especificações geométricas, de acordo com a sua resistência nominal média à compressão na área bruta, para todos os blocos utilizados neste trabalho.

Tabela 3.1 – Especificação dos blocos cerâmicos

Série	Unidade	Resistência média	Dimensões nominais (mm)		
			Largura	Altura	Comprimento
Série I	Bloco	8,0 MPa	140	190	290
Série II	cerâmico	10,0 MPa	140	190	290
Série III	inteiro	12,0 MPa	140	190	290

Fonte: Autoria própria.

Para cada série, 13 blocos cerâmicos foram utilizados para a caracterização geométrica e física, segundo recomendações dadas pela ABNT NBR 15270-2:2017, observando os requisitos, tolerâncias e quantidades amostradas segundo a ABNT NBR 15270-1:2017. Posteriormente, nestas mesmas unidades cerâmicas foram realizados os ensaios para avaliação não destrutiva ultrassônica e os ensaios de caracterização mecânica destrutiva para obtenção das suas respectivas propriedades. A seguir, serão descritas as metodologias adotadas e os resultados obtidos em cada uma das etapas da caracterização destes blocos cerâmicos, bem como da avaliação ultrassônica nos mesmos. Cabe ainda mencionar que, embora apresentados no texto de maneira a uniformizar as discussões, os ensaios foram realizados conforme a sequência cronológica comentada anteriormente.

3.1.1 Caracterização geométrica

Para determinação das propriedades geométricas foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 15270-2:2017. As propriedades foram obtidas com o auxílio de um paquímetro com sensibilidade de 0,01 mm e curso total de 150 mm, uma régua com resolução de 1 mm, um esquadro metálico de 90° e uma balança digital com resolução de 0,1 g. Os blocos foram dispostos sobre uma superfície plana e indeformável, e as medidas obtidas são resultados da média entre as medições realizadas em duas faces opostas da largura, comprimento e da altura.

A obtenção das dimensões dos septos e paredes externas foi realizada buscando os pontos onde a parede do bloco apresentava a menor espessura, tendo sido realizadas quatro medidas para as paredes externas dos blocos e quatro medidas para os septos internos. O desvio em relação ao esquadro foi obtido com auxílio de esquadro metálico de 90° e paquímetro. Por conta da indisponibilidade de defletômetros no Laboratório utilizado, a planeza das faces foi determinada por meio de procedimento similar mediante utilização de régua metálica e medida de profundidade de um paquímetro com resolução de 0,01 mm.

A Tabela 3.2 apresenta os valores médios para as dimensões referentes à caracterização geométrica dos blocos cerâmicos.

Tabela 3.2 – Propriedades geométricas dos blocos cerâmicos (mm)

	Largura	Altura	Comprimento	Paredes externas	Septos internos	Desvio do esquadro	Planeza das faces
Série I							
Média	140,17	190,04	290,53	22,02	15,97	1,98	0,76
CV (%)	0,18	0,14	0,11	0,39	0,42	16,31	24,29
Série II							
Média	139,00	189,14	292,43	20,65	15,31	1,82	0,53
CV (%)	0,18	0,35	0,09	0,51	0,43	15,37	44,78
Série III							
Média	138,40	187,96	290,73	21,00	15,18	1,93	0,67
CV (%)	0,30	0,34	0,26	0,26	0,40	10,14	19,56

Fonte: Autoria própria.

Neste mesmo contexto, a ABNT NBR 15270-1:2017 estabelece a tolerância de $\pm 3,0$ mm para valores individuais das dimensões efetivas. Para as resistências indicadas anteriormente, esta mesma norma indica que para os blocos cerâmicos com paredes maciças, a espessura das paredes externas e dos septos internos não deve ser inferior a 20 mm e 8 mm, respectivamente, ao passo que não devem apresentar um desvio em relação ao esquadro e uma

defasagem em relação à planeza das faces superior a 3,0 mm. Dessa forma, observados os resultados médios apresentados na Tabela 3.2 e aqueles obtidos individualmente para cada corpo de prova, observou-se que ambas as séries atenderam às recomendações preconizadas para a caracterização geométrica.

A área bruta foi obtida através do produto entre a largura e comprimento efetivos de cada unidade, sem o desconto das áreas dos furos e reentrâncias. Em seguida, obteve-se a área líquida utilizando o princípio de Arquimedes, ou seja, a partir do volume de água deslocado através da aferição das massas aparente e saturada das unidades, conforme a Equação 3.1.

$$A_l = \frac{M_u - M_a}{\gamma_a \cdot h} \cdot 10 \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

A_l é a área líquida da unidade (em cm²);

M_u é a massa do bloco saturado (em g);

M_a é a massa aparente do bloco, obtida mediante pesagem hidrostática (em g);

γ_a é a massa específica da água, admitida como 1 g/cm³;

h é a altura do bloco (em mm).

Para realização de tais medidas, os blocos foram submersos em água à temperatura ambiente de 20 °C ± 5 °C durante 24 horas e pesados inicialmente submersos para obtenção da massa aparente e, posteriormente, pesados sem excesso de água em suas superfícies para obtenção da massa úmida.

A Tabela 3.3 apresenta os resultados médios de área bruta, líquida e a relação A_l/A_b para os blocos cerâmicos utilizados, observando que tal relação foi de aproximadamente 48 a 50% para todas as unidades.

Tabela 3.3 – Área bruta, área líquida e relação A_l/A_b

	Área bruta (cm ²)	Área líquida (cm ²)	A_l/A_b (%)
Série I			
Média	407,23	196,09	48,15
CV (%)	0,23	0,88	1,03
Série II			
Média	406,47	202,21	49,75
CV (%)	0,21	0,81	0,91
Série III			
Média	402,35	195,12	48,50
CV (%)	0,51	0,95	1,29

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Caracterização física

As propriedades físicas dos blocos cerâmicos foram avaliadas através do índice de absorção (α), porosidade (η), densidade aparente (γ), densidade específica (ρ) e coeficiente de absorção por capilaridade (α_c). Ambas as características físicas foram obtidas conforme as recomendações da ABNT NBR 15270-2:2017 utilizando uma balança digital com resolução de 0,01 g e estufa com controle de temperatura ajustável a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Após obtenção das massas aparente e saturada comentadas anteriormente, a massa seca foi determinada após os corpos de prova submeterem-se à secagem em estufa por 24 horas, com pesagem posterior imediatamente após a remoção da estufa. Foram realizadas duas pesagens consecutivas com intervalo mínimo de uma hora, até que os resultados não divergiram em mais de 0,25%.

Dessa maneira, o índice de absorção de água em cada corpo de prova foi determinado a partir da relação envolvendo a massa úmida e massa seca do mesmo, como descrito pela Equação 3.2, enquanto a porosidade do material foi obtida através da Equação 3.3. Neste mesmo sentido, as relações expressas na Equação 3.3 e Equação 3.4 foram utilizadas para obtenção das densidades aparente e específica do material.

$$\alpha = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad \text{Equação 3.2}$$

$$\eta = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_a} \cdot 100 \quad \text{Equação 3.3}$$

$$\gamma = \frac{M_s}{M_u - M_a} \cdot 1000 \quad \text{Equação 3.4}$$

$$\rho = \frac{M_s}{M_s - M_a} \cdot 1000 \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

α é o índice de absorção de água (em %);

η é a porosidade (em %);

γ é a densidade aparente (em kg/m³);

ρ é a densidade específica (em kg/m³);

M_s é a massa do bloco seco (em g).

Após retirada dos blocos da estufa e obtenção da massa seca, os mesmos foram mantidos ao ar livre por no mínimo 2h para resfriamento e depois pesados para obtenção da massa inicial do ensaio de absorção inicial de água. Em seguida, os blocos foram posicionados em seus terços médios sobre dois suportes metálicos na região interna de um

reservatório com área de 40 x 60 cm, de modo que a face inferior de cada corpo de prova fosse mantida em contato com uma lâmina de água de aproximadamente $3,0 \pm 0,2$ mm durante 60 segundos, mediante recomendações da ABNT NBR 15270-2:2017. Posteriormente, os blocos foram retirados do contato com a lâmina de água e pesados sem excesso de água superficial para obtenção da massa final do ensaio de absorção inicial. Após este procedimento, o cálculo do índice de absorção de água inicial ou coeficiente de absorção por capilaridade pôde ser obtido através da Equação 3.6.

$$\alpha_c = \frac{M_1 - M_0}{A_t} \cdot 1000 \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde:

α_c é o coeficiente de absorção por capilaridade (em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}$);

M_1 é a massa final após imersão em lâmina de água por 60s (em g);

M_0 é a massa inicial seca após resfriamento do corpo de prova (em g).

A Tabela 3.4 expressa os resultados médios obtidos para as propriedades físicas de todas as unidades. Do ponto de vista normativo, a ABNT NBR 15270-1:2017 indica que o índice de absorção de água para unidades cerâmicas estruturais com paredes maciças deve permanecer entre 8,0 e 21,0%. Portanto, todas as unidades permaneceram entre os limites estabelecidos.

Tabela 3.4 – Propriedades físicas dos blocos cerâmicos

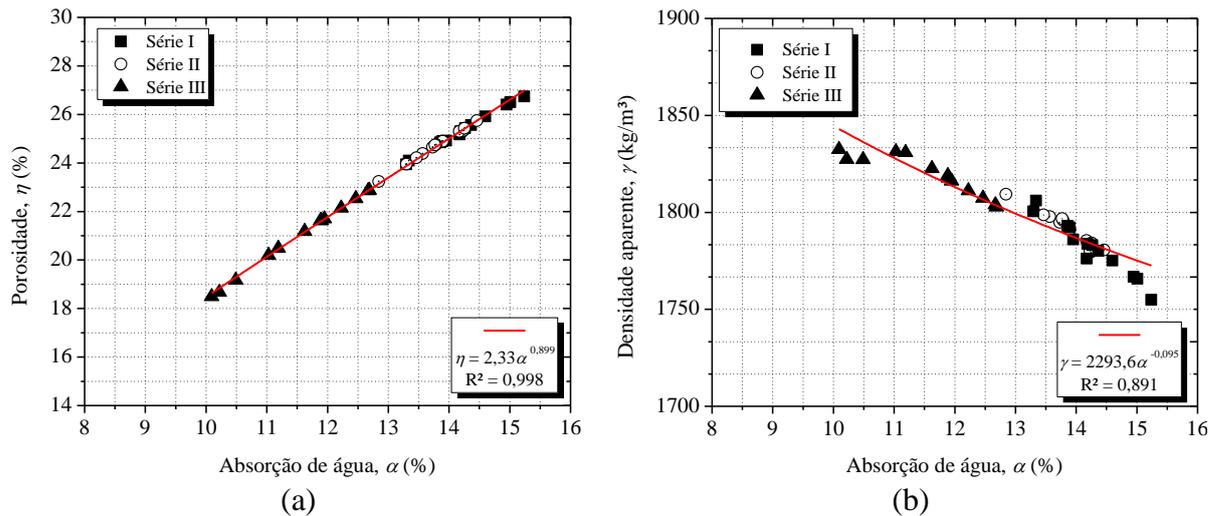
	Índice de absorção (%)	Porosidade (%)	Densidade aparente (kg/m^3)	Densidade específica (kg/m^3)	Coeficiente de absorção por capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}$)
Série I					
Média	14,24	25,37	1781,82	2387,48	1,88
CV (%)	4,20	3,41	0,81	0,44	5,52
Série II					
Média	13,82	24,77	1791,93	2381,95	1,94
CV (%)	3,30	2,81	0,52	0,45	6,97
Série III					
Média	11,57	21,04	1819,21	2304,58	1,77
CV (%)	7,75	7,23	0,58	1,42	7,71

Fonte: Autoria própria.

De maneira geral, observou-se uma redução da absorção de água e da porosidade dos blocos cerâmicos conforme elevação da resistência média à compressão estimada, como esperado em decorrência do aumento da densidade aparente do material em razão da diminuição dos vazios presentes no material. Indo ao encontro dos baixos coeficientes de

variação observados, boas correlações iniciais entre estas propriedades também puderam ser obtidas, indicando uma relação direta e proporcional entre o índice de absorção de água e a sua respectiva porosidade, bem como a redução da densidade do material em função do aumento do seu índice de absorção inicial, por conta do conseqüente acréscimo no índice de vazios, como apontado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Relações entre (a) absorção de água e porosidade e (b) absorção de água e densidade aparente



Fonte: Autoria própria.

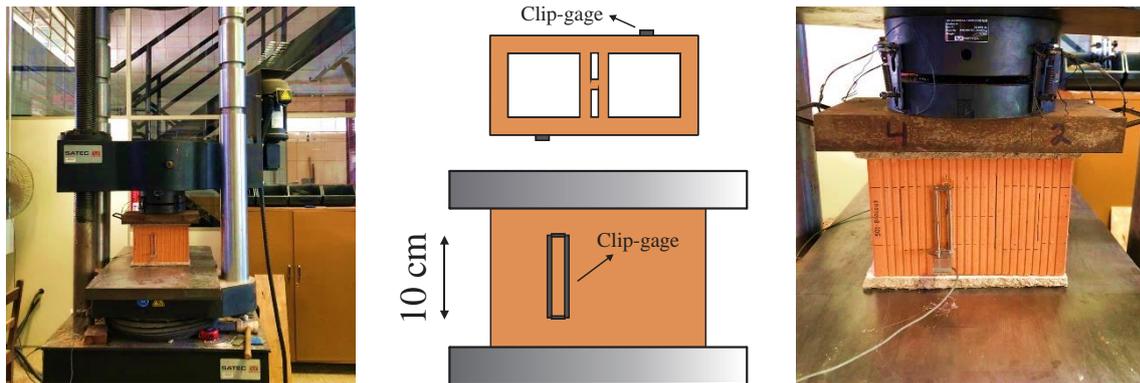
3.1.3 Caracterização mecânica

As propriedades mecânicas dos blocos cerâmicos foram obtidas conforme recomendação da ABNT NBR 15270-2:2017. Durante a realização dos ensaios de resistência à compressão, realizou-se o capeamento das faces superior e inferior dos blocos com placas de forro constituído de fibra mineral. As placas de forro com fibra mineral já foram utilizadas em outros trabalhos experimentais no Laboratório de Estruturas como em Mata (2011), Oliveira (2014), Izquierdo (2015) e Fernandes Neto (2020) e, mostraram-se satisfatórias para adequada obtenção das propriedades mecânicas, evitando a concentração de tensões nas superfícies dos blocos em decorrência da conformação irregular ou presença de agregados.

A resistência à compressão dos blocos foi determinada por meio de ensaio de compressão simples utilizando uma máquina Instron Satec[®], modelo 300 HVL, com capacidade nominal de 1500 kN, e aplicação de controle de deslocamentos a uma velocidade de 0,02 mm/s. Além disso, para avaliação da deformabilidade dos blocos cerâmicos foram utilizados dois *clip-gages* de base igual a 10 cm, posicionados de forma antissimétrica nas duas faces longitudinais dos blocos, conforme apresentado na Figura 3.3. Embora a ABNT

NBR 15270-2:2017 prescreva que os ensaios mecânicos devam ser realizados com os corpos de prova na condição saturada, após imersão em água, todos os testes mecânicos realizados neste trabalho ocorreram com as unidades secas e submetidas à temperatura ambiente, devido à fixação dos *clip-gages* utilizando dispositivo à quente. Além disso, tal condição assemelha-se com as condições encontradas *in situ*, possibilitando a sua correlação.

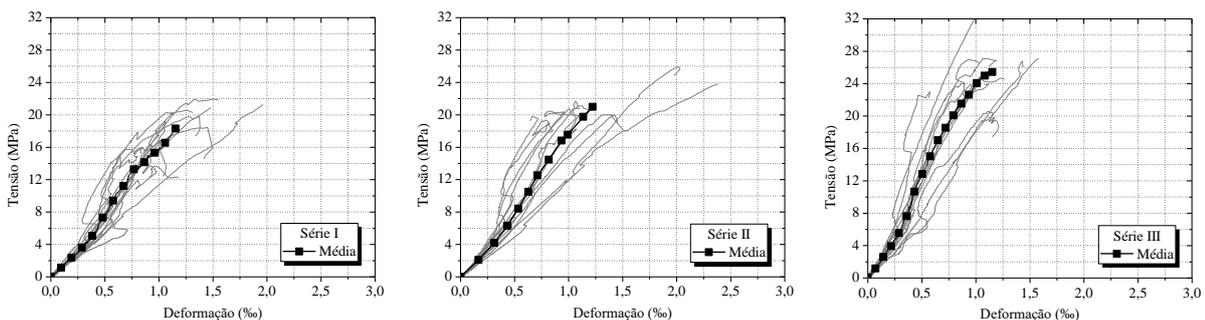
Figura 3.3 – Ensaio de resistência à compressão em bloco cerâmico



Fonte: Autoria própria.

Dessa maneira, possibilitou-se a aquisição das curvas tensão x deformação específica apresentadas na Figura 3.4 e a determinação do módulo de elasticidade secante estático (E_s), por sua vez obtido conforme recomendação do ACI 530-11:2011, cujo trecho de análise situa-se entre 5% e 33% da tensão de ruptura. Acrescenta-se ainda que, todos os diagramas tensão x deformação apresentados neste trabalho com valores positivos, referem-se a tensões compressivas e deformações de encurtamento. Além disso, no que diz respeito às tensões ou resistências indicadas, estas referem-se aos valores de tensão tomando como base a área líquida do elemento estrutural, exceto quando observações contrárias forem realizadas. Acrescenta-se ainda que, todas as amostras foram avaliadas segundo o teste estatístico de Grubbs (1969) para verificar a existência de valores espúrios (Apêndice A), posterior à aplicação do teste estatístico de Shapiro e Wilk (1965) para avaliação da distribuição normal das amostras.

Figura 3.4 – Diagramas tensão x deformação dos blocos cerâmicos das séries I, II e III



Fonte: Autoria própria.

A resistência característica à compressão das unidades foi calculada conforme o Anexo A da ABNT NBR 16868-3:2020, a partir da resistência característica estimada e do número de exemplares da amostra. Os valores médios e característicos da resistência à compressão dos blocos, além dos seus respectivos módulos de elasticidade estáticos ($E_{s,b}$) são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos blocos cerâmicos

	Resistência na A_b (MPa)	Resistência na A_l (MPa)	Módulo de elasticidade $E_{s,b}$ na A_b (GPa)	Módulo de elasticidade $E_{s,b}$ na A_l (GPa)
Série I				
Média	8,87	18,45	6,36	13,21
CV (%)	13,95	14,59	19,27	19,33
f_{bk}	6,63	13,51	-	-
Série II				
Média	10,44	20,99	7,62	15,77
CV (%)	12,26	12,05	23,15	21,08
f_{bk}	8,79	17,77	-	-
Série III				
Média	12,35	25,49	10,73	22,13
CV (%)	10,66	11,05	21,52	21,85
f_{bk}	10,25	21,35	-	-

Fonte: Autoria própria.

De maneira geral, observa-se que a resistência média dos blocos na área bruta manteve-se ligeiramente superior à resistência estimada inicialmente que foi apresentada na Tabela 3.1. Entretanto, para todas as séries mantiveram-se de forma crescente tanto a resistência à compressão, quanto o módulo de elasticidade estático, conforme as séries I, II e III, respectivamente.

Além disso, para avaliar se realmente existiam diferenças significativas entre as unidades das séries I, II e III, as séries tiveram suas respectivas amostras analisadas estatisticamente quanto à resistência à compressão média e módulo de elasticidade estático para confirmar que as mesmas divergiam significativamente ($p\text{-value} \leq 0,05$) através dos testes de hipóteses F e T , cujo nível de significância adotado foi de 5%, conforme ilustrado na Tabela 3.6. As especificidades dos referidos testes foram apresentadas com maiores detalhes no Apêndice B, e a partir dos resultados apresentados na Tabela 3.6 notou-se que em todas as comparações relativas entre duas séries distintas o $p\text{-value}$ manteve-se abaixo de 5%, confirmando a divergência significativa entre as amostras. Diferenças menos acentuadas foram observadas na comparação entre o módulo de elasticidade estático das séries I e II,

enquanto as mais significativas foram notadas entre as séries I e III de ambas propriedades.

Tabela 3.6 – Teste de hipóteses estatístico para as propriedades mecânicas dos blocos

Propriedade	Comparação		T	T_{crit}	p -value	Significância
f_b	Série I	Série II	3,181	2,391	$4,02 \times 10^{-3}$	Sim
	Série I	Série III	6,947	2,391	$3,56 \times 10^{-7}$	Sim
	Série II	Série III	3,751	2,391	$9,87 \times 10^{-4}$	Sim
$E_{s,b}$	Série I	Série II	2,555	2,398	$1,87 \times 10^{-2}$	Sim
	Série I	Série III	6,022	2,391	$3,23 \times 10^{-6}$	Sim
	Série II	Série III	3,620	2,398	$1,55 \times 10^{-4}$	Sim

Fonte: Autoria própria.

Quanto ao modo de ruptura, de modo geral a ruína das unidades cerâmicas ocorreu de maneira brusca e explosiva devido ao comportamento frágil do material. Assim, a mesma foi caracterizada pelo estilhaçamento do material e formação de fissuras características devido ao elevado confinamento provocado pela prensa hidráulica, conforme mostrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Modo de ruptura dos blocos cerâmicos



Fonte: Autoria própria.

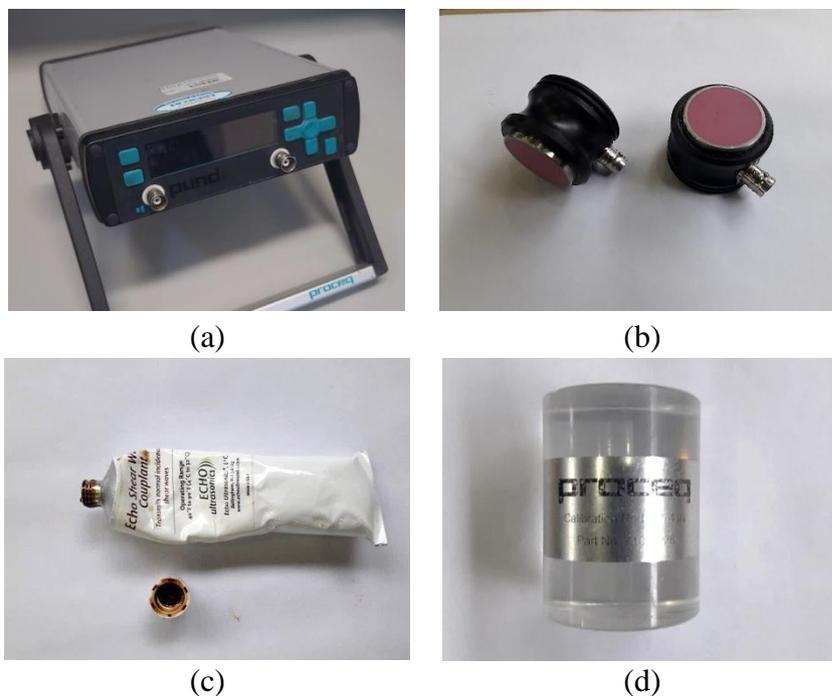
3.1.4 Avaliação ultrassônica

As mesmas 13 amostras de blocos cerâmicos utilizados para obtenção das propriedades geométricas, físicas e mecânicas em cada uma das séries, foram empregadas para aplicação de ensaios não destrutivos ultrassônicos visando avaliar a distribuição da velocidade de pulso ultrassônico ao longo das diferentes direções das unidades e possíveis relações que possibilitassem a estimativa de suas propriedades físico-mecânicas a partir dos resultados obtidos nos ensaios não destrutivos.

O ensaio consistiu na medição da velocidade de pulso ultrassônico em diversos pontos dos blocos cerâmicos através de medidas diretas em que se avaliou a propagação de ondas

longitudinais e transversais (ondas de cisalhamento), seguindo as instruções da ABNT NBR 8802:2019 no que diz respeito à preparação da amostra e realização do ensaio. Para a medição e armazenamento dos sinais ultrassônicos, utilizou-se o equipamento Pundit Lab⁺ com *software* próprio acoplado da Proceq[®], que possui resolução de 0,1 μ s e pode ser utilizado com transdutores de frequência nominal entre 54 e 500 kHz. Para aquisição das medidas, utilizou-se um par de transdutores específicos para ondas de cisalhamento com frequência nominal de 250 kHz, que também realizam a aquisição das ondas longitudinais simultaneamente. Na interface de contato entre os transdutores e o bloco cerâmico empregou-se um gel acoplante de alta viscosidade da Echo Ultrasonics[®] adequado para aplicações em temperatura ambiente com variações entre 4 °C e 32 °C que permitia a transmissão de ambas as ondas. Além disso, antes da realização de cada ensaio foi realizada a calibração dos transdutores e do equipamento de ultrassom a partir de um cilindro de calibração com tempo de percurso de ondas definido, também desenvolvido pela Proceq[®]. Todos os materiais e equipamentos empregados nos ensaios ultrassônicos para avaliação ultrassônica nos blocos sem tensão podem ser visualizados na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Equipamentos e materiais utilizados no ensaio ultrassônico: a) aparelho de ultrassom Pundit Lab⁺, b) transdutores de cisalhamento com 250 kHz, c) gel acoplante e d) cilindro de calibração



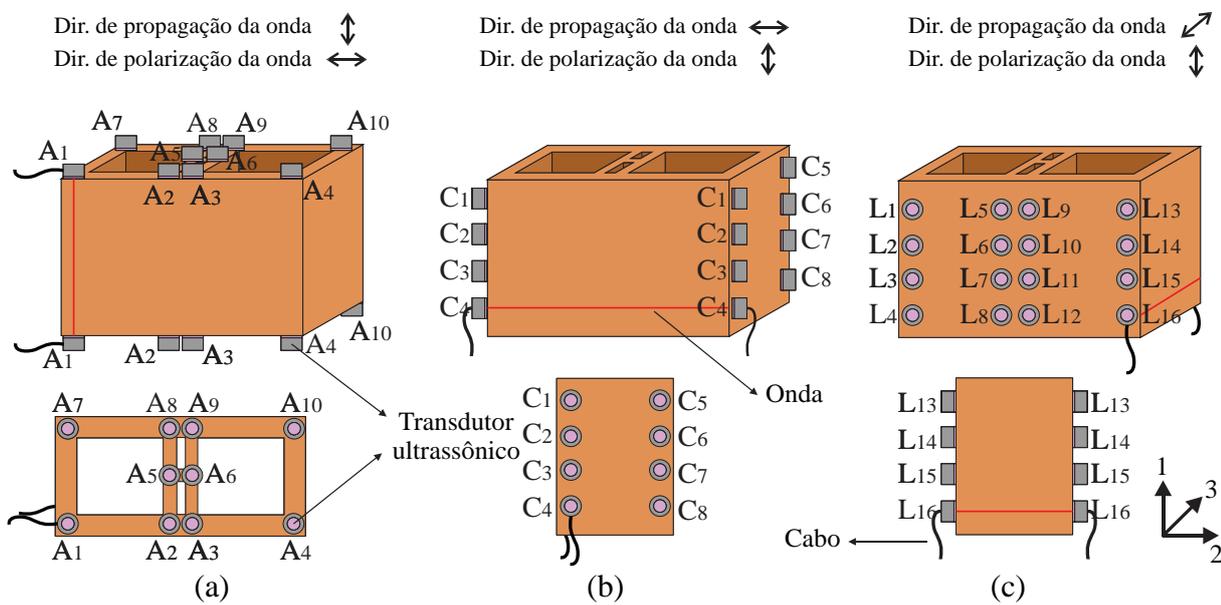
Fonte: Autoria própria.

De forma geral, a geometria do bloco cerâmico é relativamente complexa, uma vez que é constituído por saliências, reentrâncias, possui a presença de vazios, além de paredes externas e septos internos com diferentes espessuras. Além disso, durante a etapa de

fabricação, o bloco cerâmico é submetido a um processo de extrusão e queima que, naturalmente, pode interferir nas suas propriedades. Por este motivo, os ensaios ultrassônicos nos blocos foram realizados tomando diversos pontos ao longo da superfície do mesmo, considerando a propagação das ondas em suas três direções ortogonais (altura, comprimento e largura) com o objetivo de realizar o mapeamento da velocidade de pulso ultrassônico e das respectivas propriedades associadas ao longo dos diferentes pontos de medição.

Dessa forma, idealizou-se uma malha retangular fictícia que possibilitou a realização de medidas em 10 pontos ao longo da altura do bloco (medidas A₁ a A₁₀), cada um deles inseridos na junção entre as paredes externas e/ou septos internos, oito pontos ao longo do comprimento do bloco (medidas C₁ a C₈), cada um deles inseridos ao longo das duas faces longitudinais do elemento e 16 pontos ao longo da largura do bloco (medidas L₁ a L₁₆), por sua vez distribuídos ao longo das duas faces laterais externas (paredes) e das duas faces laterais internas (septos), conforme indicado na Figura 3.7. Cabe mencionar ainda que em cada um desses pontos de medições foram aplicados 10 pulsos ultrassônicos.

Figura 3.7 – Metodologia para realização dos ensaios ultrassônicos ao longo da (a) altura, (b) comprimento e (c) largura dos blocos cerâmicos

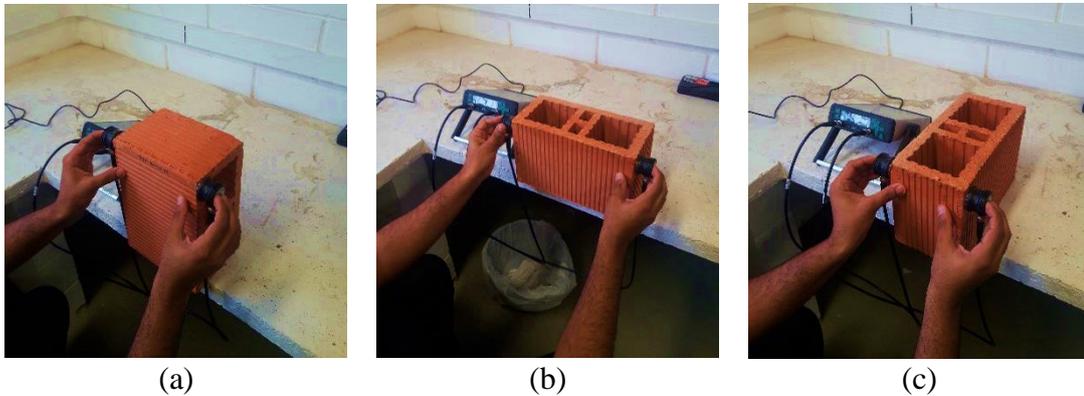


Fonte: Autoria própria.

No que diz respeito à propagação das ondas ultrassônicas, observa-se através do posicionamento dos transdutores indicado na Figura 3.8 que foram realizadas medidas diretas entre duas faces opostas do elemento e a propagação das ondas longitudinais ocorreu, naturalmente, ao longo de cada uma das respectivas direções. Neste mesmo contexto, as ondas transversais foram polarizadas na direção da altura (quando propagadas ao longo do comprimento e da largura) e na direção do comprimento (quando propagadas na direção da

altura), seguindo a mesma orientação dos cabos utilizados em cada um dos transdutores ultrassônicos, como observado anteriormente.

Figura 3.8 – Realização dos ensaios ultrassônicos ao longo da (a) altura, (b) comprimento e (c) largura dos blocos cerâmicos



Fonte: Autoria própria.

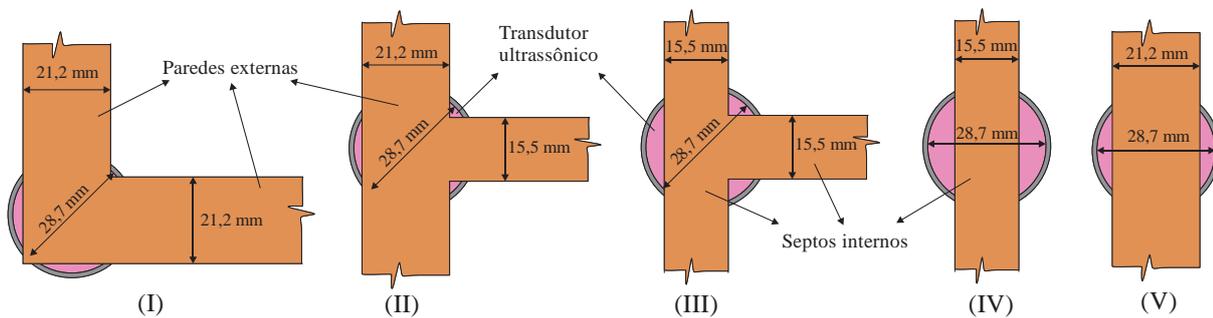
No que diz respeito às ondas longitudinais, o próprio aparelho de ultrassom foi utilizado para identificação do tempo de chegada dessas ondas, entretanto, como tal equipamento não realiza a identificação do instante de chegada das ondas transversais, um software desenvolvido por Schiavon (2015) foi utilizado para avaliação destas ondas.

Uma vez identificados os tempos de chegada para cada uma das ondas, as velocidades ultrassônicas longitudinais e transversais foram obtidas a partir da razão entre a distância da medição e o tempo de chegada. Como 10 pulsos ultrassônicos foram aplicados em cada uma das medições, a velocidade representativa de cada medida foi dada pela média entre aquela obtida através dos 10 pulsos. Além disso, como haviam diferentes pontos de medições para cada uma das direções ortogonais (Figura 3.7), a média entre todos os pontos de uma mesma direção determinava a VPU de um bloco cerâmico naquela direção. Finalmente, para obtenção da velocidade de pulso ultrassônico de cada uma das séries de blocos, realizava-se a média das velocidades de cada uma das direções entre todos os 13 blocos avaliados para cada série.

Quanto ao posicionamento dos transdutores em relação a região do bloco de interesse, os transdutores assumiram os cinco diferentes posicionamentos indicados na Figura 3.9. Os posicionamentos I, II e III referem-se às medidas realizadas ao longo da altura do bloco, em que a posição I foi aplicada nas medições dos quatro cantos do bloco (A_1 , A_4 , A_7 e A_{10}), a posição II foi aplicada nos pontos intermediários de junção entre as paredes externas e septos internos (A_2 , A_3 , A_8 e A_9) e a posição III foi aplicada nas medidas realizadas nos septos internos (A_5 e A_6). Os posicionamentos IV e V, embora representados com o transdutor saliente em relação ao material, foram aplicados nas medições ao longo do comprimento e da

largura, ou seja, estavam posicionados em uma das faces superficiais dos blocos. O motivo pelo qual a representação foi realizada dessa maneira diz respeito ao fato de que, embora posicionados nas faces superficiais, a propagação das ondas ocorreu ao longo das paredes e septos especificados em IV e V. Nesse sentido, observa-se que a situação mais crítica ocorreu na posição IV que se refere à propagação ao longo da largura dos septos internos (L_5 a L_{12}). Posteriormente, na avaliação do comprimento de onda de cada uma das medidas, notou-se que tal situação não foi preponderante.

Figura 3.9 – Posicionamento dos transdutores ultrassônicos em relação à região de propagação das ondas ultrassônicas



Fonte: Autoria própria.

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

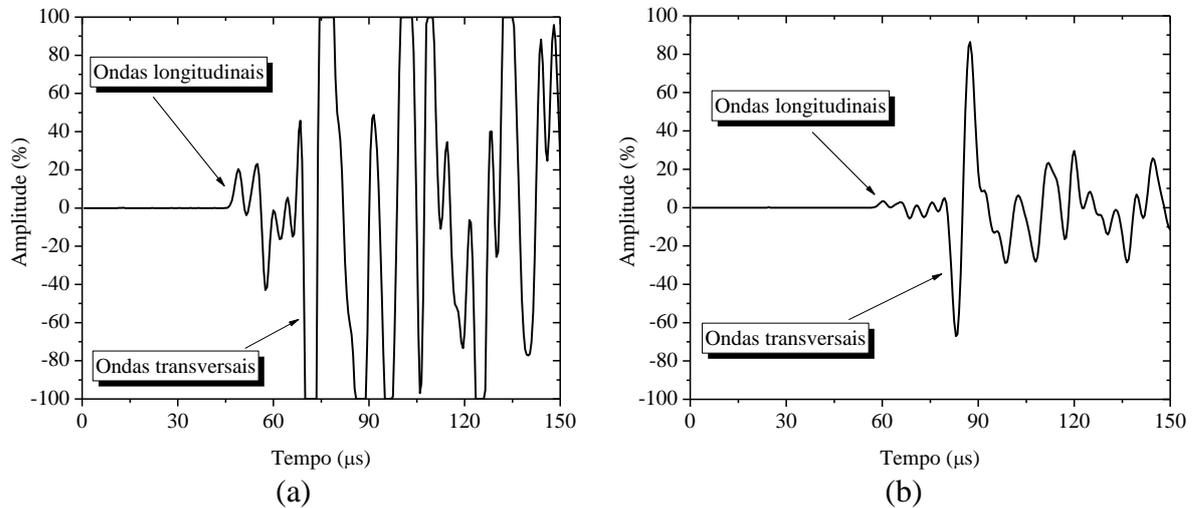
Uma vez que a metodologia descrita anteriormente possibilitou a aquisição das ondas longitudinais e transversais de maneira simultânea, durante os ensaios foram realizadas duas medições em cada ponto de medição identificado na Figura 3.7 para que fosse possível realizar uma identificação consistente do instante de chegada de cada uma delas.

Como a amplitude dessas ondas é significativamente diferente, a primeira medição visava a obtenção apenas do instante de chegada das ondas longitudinais, uma vez que as configurações de ganho e amplitude do pulso foram ajustadas para garantir uma boa visualização apenas destas ondas, como pode ser visto na Figura 3.10a. Por outro lado, uma vez que na primeira medição a amplitude das ondas transversais apresentava-se superior à escala do aparelho de ultrassom, esta foi ajustada em uma segunda medição que tinha como objetivo a clara identificação do instante de chegada apenas das ondas transversais, mantendo as ondas longitudinais com baixa energia, conforme a Figura 3.10b.

Diante dos sinais obtidos, observa-se uma amplitude superior das ondas transversais em relação às ondas longitudinais. Segundo Andreucci (2018), isto ocorre pelo próprio processo de propagação dessas ondas, uma vez que as ondas longitudinais apresentam uma propagação de partículas que oscilam na mesma direção de propagação da onda. Em

contrapartida, no caso das ondas transversais as partículas do meio vibram na direção perpendicular ao de propagação das ondas e apresentam uma energia mais elevada.

Figura 3.10 – Sinais ultrassônicos típicos em blocos cerâmicos para análise de (a) ondas longitudinais e (b) ondas transversais



Fonte: Autoria própria.

Ainda que a metodologia descrita previamente tenha possibilitado a obtenção das velocidades para cada uma das direções, com o objetivo de empregar uma medida mais prática, considerou-se a velocidade ultrassônica média de cada um dos blocos ($V_{L,b}$ e $V_{T,b}$) como sendo a média das velocidades representativas ao longo de cada uma das direções ortogonais. Dessa forma, a Tabela 3.7 apresenta as velocidades ultrassônicas longitudinais e transversais para cada uma das séries avaliadas.

Tabela 3.7 – Velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e transversal em blocos cerâmicos

Série	Direção de análise						Média	
	Altura		Comprimento		Largura		$V_{L,b}$ (m/s)	$V_{T,b}$ (m/s)
	$V_{Lb,A}$ (m/s)	$V_{Tb,A}$ (m/s)	$V_{Lb,C}$ (m/s)	$V_{Tb,C}$ (m/s)	$V_{Lb,L}$ (m/s)	$V_{Tb,L}$ (m/s)		
Série I								
Média	2864,9	1493,8	2479,4	1645,4	2378,2	1551,2	2574,1	1563,2
CV (%)	2,93	3,41	2,79	2,90	3,18	2,95	2,86	2,79
Série II								
Média	2892,6	1555,8	2475,0	1644,6	2428,4	1579,8	2598,7	1593,4
CV (%)	2,34	2,04	1,93	1,66	3,40	2,76	2,46	1,60
Série III								
Média	3163,1	1653,7	2834,1	1852,5	2697,0	1778,5	2898,1	1761,6
CV (%)	5,45	4,05	7,14	5,47	5,90	3,80	6,09	4,11

Fonte: Autoria própria.

É importante mencionar que as velocidades ultrassônicas médias nos blocos não foram obtidas através da média de todos os 34 pontos de medições porque não foi utilizada a mesma quantidade de pontos em todas as direções. Assim, a média global de todos os pontos apresentaria uma tendência de se aproximar da média da direção que possuía mais pontos de medições. Entretanto, o CV da média global é mais representativo da heterogeneidade do bloco e, para todas as séries, estes foram de 9,8 a 10,5% para $V_{L,b}$ e de 5,9 a 8,1% para $V_{T,b}$.

Ademais, embora os elementos de alvenaria estrutural estejam submetidos predominantemente à compressão, ou seja, a um esforço cujas deformações são mobilizadas de maneira preponderante ao longo da altura do bloco, elementos estruturais como vigas de alvenaria e paredes com comportamento fora do plano podem estar submetidos a esforços solicitantes cujas deformações sejam mobilizadas de maneira preeminente nas outras duas direções ortogonais. Assim, a velocidade média apresenta a possibilidade de contemplar todas as medidas com um teor mais prático e aplicado.

Com base nos resultados das velocidades longitudinais e transversais dos blocos para cada uma das séries, observa-se a existência de baixos coeficientes de variação em todas as direções ortogonais, bem como na velocidade média global, o que destaca a eficácia dos ensaios ultrassônicos para a avaliação destes materiais, assim como a baixa variabilidade de resultados de uma série de blocos, apresentando coeficientes de variação substancialmente inferiores àqueles obtidos nos ensaios mecânicos tradicionais.

Além disso, nota-se uma elevação de ambas as velocidades ultrassônicas, conforme o aumento da resistência mecânica e módulo de elasticidade das unidades, de forma que as propriedades dinâmicas da série III foram superiores em relação às demais. Embora esta tendência tenha acompanhado a mesma tendência dos resultados mecânicos tradicionais, pode-se observar também que as velocidades ultrassônicas aumentaram conforme a redução da absorção de água e porosidade das unidades cerâmicas, o que implicou diretamente na diminuição dos vazios no material. Estas observações também foram realizadas por Marvila *et al.* (2019) durante a avaliação ultrassônica em blocos cerâmicos com paredes vazadas.

A avaliação da velocidade de pulso ultrassônico também possibilitou a análise quanto ao comprimento de onda (λ_0) durante os ensaios, através da relação entre a velocidade de pulso ultrassônica obtida nos blocos cerâmicos e a frequência dos transdutores utilizados para aquisição de tais velocidades, conforme a Equação 3.7.

$$\lambda_0 = \frac{VPU}{f} \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde:

λ_o é o comprimento de onda (em mm);

VPU é a velocidade de pulso ultrassônica no bloco cerâmico (em m/s);

f é a frequência dos transdutores ultrassônicos (em KHz).

Dessa forma, tomando como base os resultados médios de cada uma das séries, a Tabela 3.8 apresenta o comprimento de onda máximo (para as ondas longitudinais) e mínimo (para as ondas transversais). Percebe-se que para todos os casos o comprimento de onda máximo foi de 12,65 mm, que é inferior a espessura das paredes externas (21,2 mm) e dos septos internos (15,5 mm) dos blocos investigados. Dessa forma, embora a Figura 3.9 tenha indicado que em algumas situações o diâmetro do transdutor era significativamente maior do que a espessura da região analisada, o comprimento de onda mostrou-se coerente para a avaliação das ondas-P e ondas-S. Neste mesmo sentido, é possível constatar também um menor comprimento de onda associado às ondas transversais, corroborando com o fato de que estas são mais sensíveis à presença de pequenas heterogeneidades e variações no meio de propagação.

Tabela 3.8 – Comprimento de onda nos blocos cerâmicos

Série	Velocidade de pulso ultrassônico (m/s)		Comprimento de onda (mm)	
	$V_{m\acute{a}x}$	$V_{m\acute{i}n}$	$\lambda_{o,m\acute{a}x}$	$\lambda_{o,m\acute{i}n}$
Série I	2864,9	1493,8	11,46	5,97
Série II	2892,6	1555,8	11,57	6,22
Série III	3163,1	1653,7	12,65	6,62

Fonte: Autoria própria.

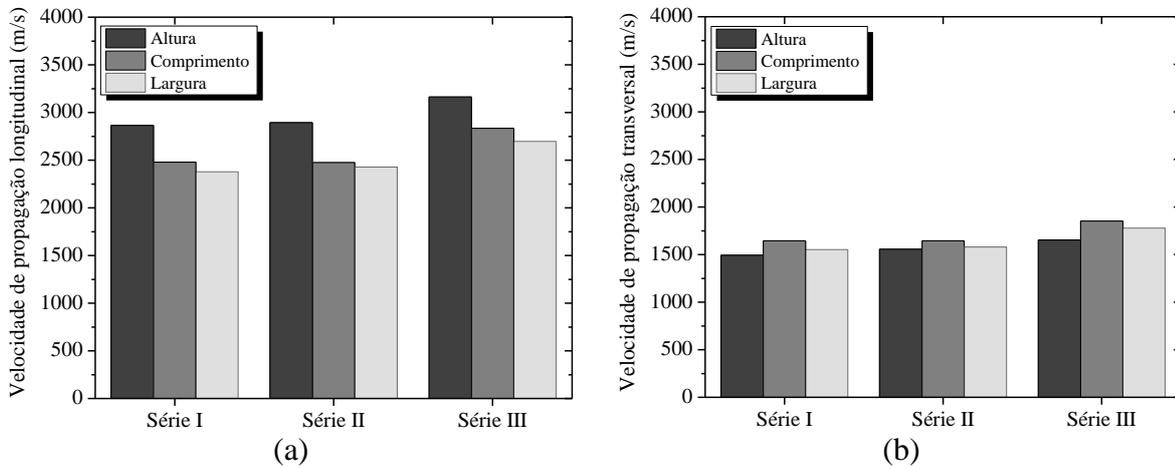
3.2.1 Variação da VPU em blocos cerâmicos

Conforme observado na Tabela 3.7, além do aumento da velocidade ultrassônica conforme elevação da resistência mecânica e redução dos vazios do material, verificou-se uma flutuação nos valores destas velocidades conforme a direção de propagação das ondas. De maneira geral, quanto às ondas longitudinais, a velocidade de propagação das ondas ao longo da altura dos blocos foi superior àquelas obtidas em relação ao comprimento e a largura das mesmas unidades. Por outro lado, para as ondas transversais esta tendência não foi verificada, como ilustrado na Figura 3.11.

Considerando a velocidade longitudinal média por direção para cada uma das séries, para a série I, de menor resistência, a VPU ao longo da altura do bloco foi aproximadamente 20,46% superior à velocidade longitudinal propagada ao longo da largura do bloco, que apresentou os menores valores. Este acréscimo se manteve para as séries II e III, que também

atingiram valores cerca de 19,11% e 17,28% superiores, respectivamente.

Figura 3.11 – Variação da velocidade ultrassônica (a) longitudinal e (b) transversal ao longo de cada uma das direções ortogonais



Fonte: Autoria própria.

Tal comportamento não foi verificado para ondas transversais que, ao contrário das longitudinais, apontaram as velocidades transversais ao longo da altura como aquelas que apresentaram os menores resultados. Quanto às ondas transversais, as ondas propagadas na direção do comprimento apresentaram as maiores velocidades ultrassônicas, seguidas por aquelas propagadas ao longo da largura. Para a série de menor resistência, a velocidade ultrassônica transversal foi de até 10,15% superior àquelas obtidas ao longo da altura, enquanto que para as séries II e III essa superioridade manteve-se em 5,7% e 12,02%, respectivamente.

Este comportamento também já foi observado por Marvila *et al.* (2019) e Sombra (2020) em blocos cerâmicos com características similares. De maneira geral, acredita-se que tal comportamento esteja relacionado com o processo de produção dos blocos cerâmicos e ligado especificamente à etapa de extrusão, que usualmente é realizada na direção da altura do bloco, com baixo confinamento lateral justamente para permitir que a extrusão do material argiloso seja realizada. Assim, a energia aplicada para que o processo de extrusão ocorra na direção da altura promove um aumento da densificação do material nesta mesma direção e consequentemente uma redução do seu índice de vazios, como indicado na Figura 3.12.

Dessa forma, como a direção da altura é a direção com menor índice de vazios, justifica-se que as ondas longitudinais propagadas ao longo desta direção sejam mais rápidas e, portanto, apresentem maiores velocidades de pulso ultrassônico em relação às do comprimento e largura. No que diz respeito às ondas transversais, também por esta razão, justifica-se o fato das velocidades ao longo do comprimento e da largura serem superiores em

relação à da altura, uma vez que essas ondas estão relacionadas à direção de polarização das partículas, que por sua vez é perpendicular à direção de propagação. Dessa forma, como as ondas propagadas ao longo do comprimento e da largura foram polarizadas na direção da altura, a velocidade de pulso ultrassônico destas ondas também será maior. Por outro lado, as ondas propagadas ao longo da altura são polarizadas na direção do comprimento do bloco (Figura 3.7), portanto, apresentam velocidades transversais mais reduzidas.

Figura 3.12 – Processo de extrusão de bloco cerâmico na direção da altura



Fonte: Autoria própria.

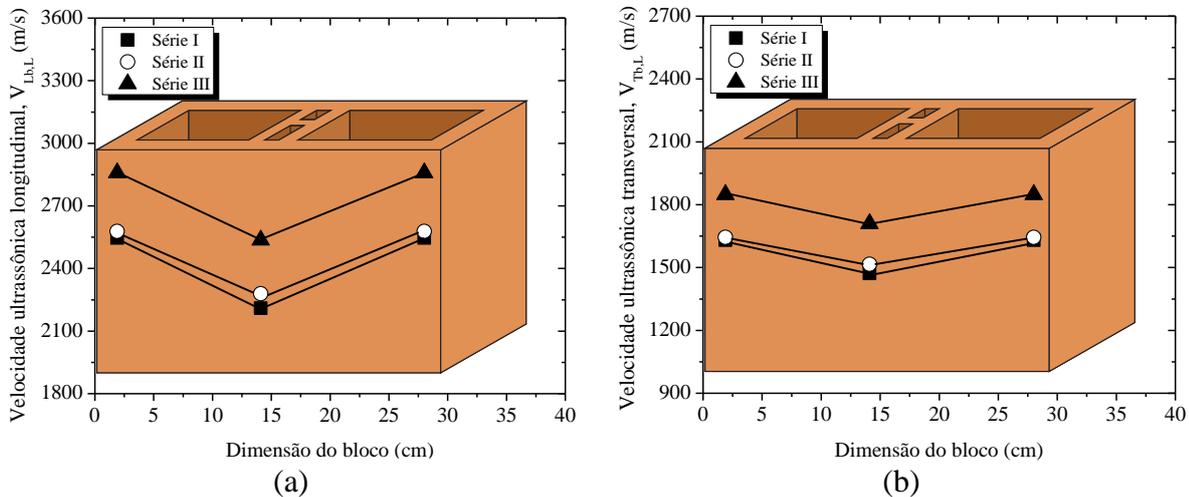
Os testes estatísticos F e T foram aplicados sobre todas as amostras de VPU que confirmaram as diferenças significativas entre as velocidades ultrassônicas das diferentes séries, exceto para a comparação entre as velocidades referentes às ondas propagadas ao longo do comprimento e da largura nas séries II e III. De fato, ao analisar a Figura 3.11 observa-se uma proximidade entre as velocidades de pulso ultrassônico longitudinal propagadas ao longo do comprimento e da altura, embora tal aproximação não tenha sido observada com clareza para a velocidade transversal. No entanto, uma vez que ambas as ondas propagadas ao longo do comprimento e da largura são polarizadas na direção da altura, uma maior concordância entre ambas as velocidades transversais do comprimento e da largura deveria ter sido observada.

Neste contexto, ao analisar a distribuição da velocidade de pulso ultrassônica ao longo das diferentes regiões dos blocos, notou-se que as medidas L_5 a L_{12} (Figura 3.7) realizadas ao longo dos septos internos na direção da largura eram significativamente menores do que aquelas realizadas ao longo das paredes externas na mesma direção (L_1 a L_4 e L_{13} a L_{16}), como mostra a Figura 3.13.

Comparando a VPU entre ambas as regiões, observou-se que as velocidades longitudinais obtidas ao longo da largura nas paredes externas foram até 15,2% superiores às obtidas ao longo da largura nos septos internos para a série I e mantiveram-se 13,1% e

12,7% superiores nas séries II e III, respectivamente. Embora com diferenças menos expressivas, esta mesma tendência também foi observada para as velocidades transversais.

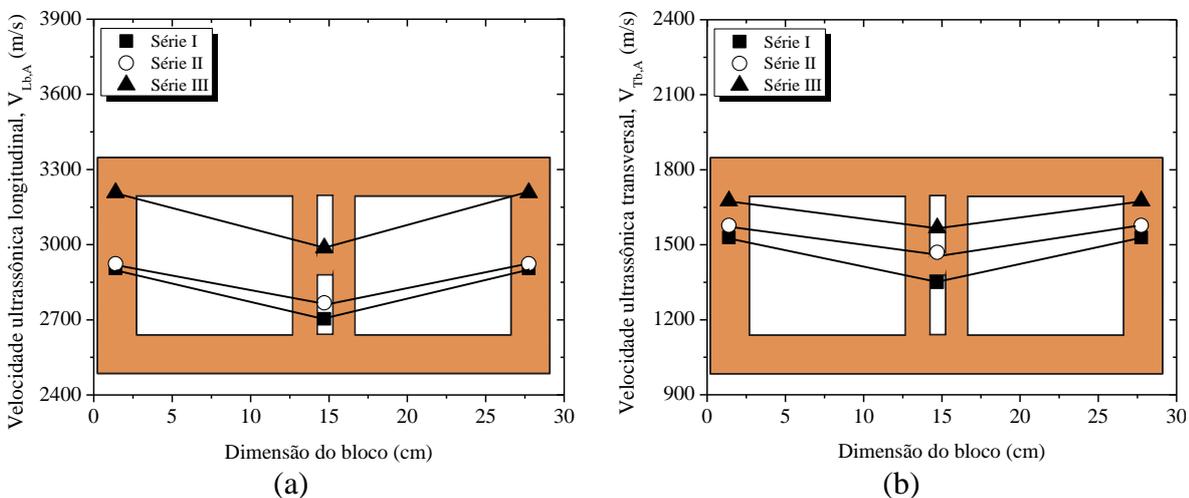
Figura 3.13 – Variação da velocidade de pulso ultrassônico (a) longitudinal e (b) transversal ao longo das diferentes regiões da largura do bloco



Fonte: Autoria própria.

Uma vez que duas medições (A_5 e A_6) também foram realizadas ao longo da altura destes septos internos, realizou-se uma análise similar para comparar as velocidades ultrassônicas longitudinais e transversais obtidas ao longo dos pontos da altura nas paredes externas e nos septos internos. Da mesma forma que relatado anteriormente para os pontos da largura, também se notou uma redução das velocidades relacionadas às ondas propagadas ao longo dos septos internos, como ilustrado pela Figura 3.14. Para o caso na direção da altura, a superioridade na velocidade longitudinal nas paredes externas variou entre 7,4% a 5,6% entre as diferentes séries.

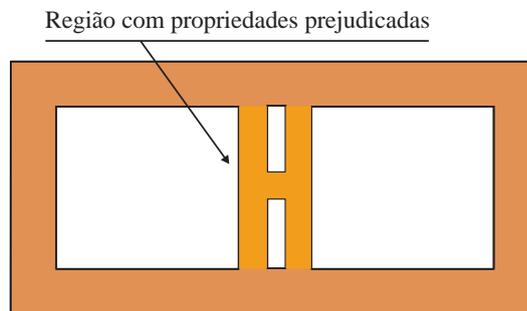
Figura 3.14 - Variação da velocidade de pulso ultrassônico (a) longitudinal e (b) transversal ao longo das diferentes regiões da altura do bloco



Fonte: Autoria própria.

Superpondo os pontos de medições ao longo da altura e ao longo da largura que apresentaram baixas velocidades ultrassônicas, observou-se que existe uma região no bloco cuja as propriedades são consideravelmente inferiores, conforme a Figura 3.15. De maneira geral, acredita-se que tal efeito também esteja relacionado ao processo de fabricação dos blocos, especificamente à etapa de queima. Uma vez que os fornos utilizados ainda são baseados na propagação de calor a partir das faces laterais das unidades e que durante a queima os elementos são empilhados em fiadas, a região central do bloco fica submetida a condições de queima inferiores e mais heterogêneas do que as regiões laterais, dificultando as propriedades nessa região.

Figura 3.15 – Região do bloco cerâmico com baixos valores de velocidade ultrassônica

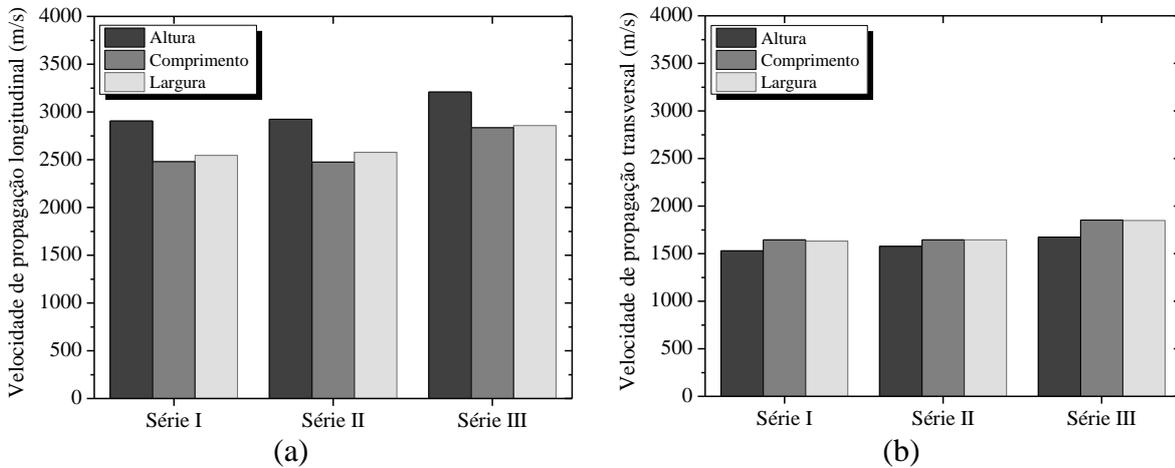


Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, como todos estes pontos de medições realizadas ao longo dos septos internos foram considerados para obtenção das velocidades médias apresentadas na Figura 3.11 é natural que ocorra uma maior divergência entre os resultados. Para verificar a significância estatística dos resultados de VPU, retirou-se da média as medidas realizadas ao longo da altura e largura dos septos internos dos blocos para garantir que o cálculo fosse realizado considerando apenas as regiões submetidas às mesmas condições durante o processo de fabricação. Assim, a Figura 3.16 apresenta a variação da velocidade ultrassônica ao longo das direções ortogonais desconsiderando os septos internos das unidades cerâmicas.

Para este caso, com a correção das velocidades, observa-se uma concordância entre as velocidades ultrassônicas do comprimento e da largura, bem como uma divergência destas em relação às velocidades obtidas ao longo da altura, tanto para as ondas longitudinais quanto transversais. Tal comportamento questiona a hipótese de isotropia nessas unidades e indica fortemente uma tendência para o comportamento transversalmente isotrópico, considerando a isotropia apenas no plano da seção transversal, ou seja, na direção da altura do bloco.

Figura 3.16 - Variação da velocidade ultrassônica (a) longitudinal e (b) transversal ao longo de cada uma das direções ortogonais



Fonte: Autoria própria.

Para atestar esta hipótese, os testes estatísticos F e T foram realizados para comparar se haviam diferenças significativas entre as médias das velocidades ultrassônicas ao longo de cada uma das direções. De maneira unânime, as velocidades ultrassônicas longitudinais e transversais ao longo do comprimento e da largura do bloco foram consideradas estatisticamente sem diferenças significativas para todas as séries analisadas (Tabela 3.9). Por outro lado, ambas velocidades mantiveram diferenças estatisticamente significativas em relação àquelas obtidas para a direção da altura.

Tabela 3.9 - Teste de hipóteses estatístico para as velocidades longitudinais e transversais ao longo do comprimento e da largura dos blocos cerâmicos

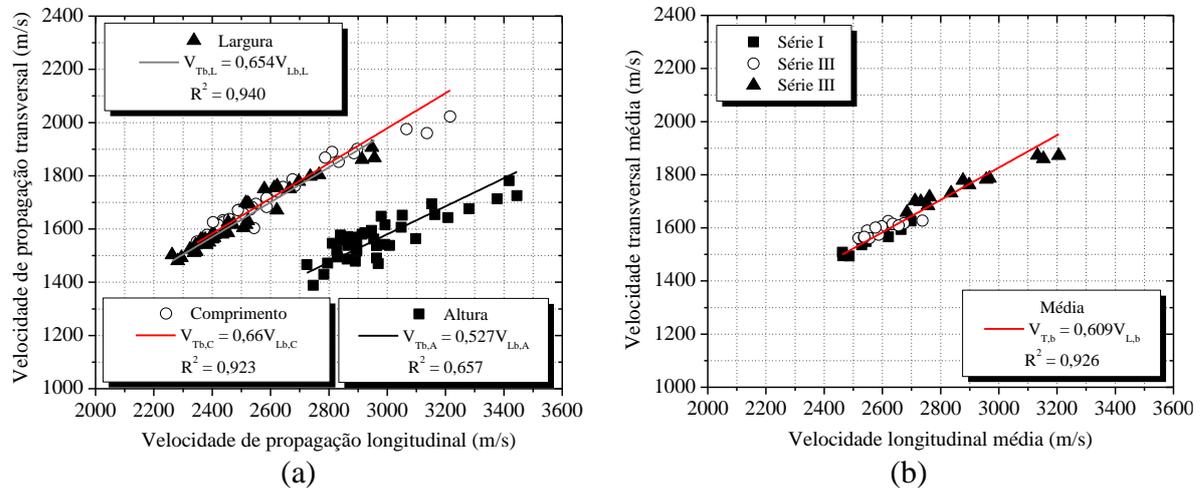
Propriedade	Série	Comparação	T	T_{crit}	p -value	Significância
V_L	Série I	$V_{Lb,C}$ $V_{Lb,L}$	2,349	2,391	0,0546	Não
	Série II	$V_{Lb,C}$ $V_{Lb,L}$	1,762	2,391	0,091	Não
	Série III	$V_{Lb,C}$ $V_{Lb,L}$	0,308	2,391	0,760	Não
V_T	Série I	$V_{Tb,C}$ $V_{Tb,L}$	0,778	2,391	0,444	Não
	Série II	$V_{Tb,C}$ $V_{Tb,L}$	0,056	2,391	0,956	Não
	Série III	$V_{Tb,C}$ $V_{Tb,L}$	0,137	2,391	0,892	Não

Fonte: Autoria própria.

A tendência de similaridade entre os resultados nas direções do comprimento e da largura e as divergências com relação à direção da altura também foram identificadas na própria relação entre as velocidades longitudinais e transversais. De forma geral, para as direções do comprimento e da largura, a velocidade ultrassônica transversal nos blocos manteve-se como aproximadamente 66% da velocidade ultrassônica longitudinal, como mostra a Figura 3.17a. Em contrapartida, esta relação foi de apenas 52,7% para ondas propagadas ao longo da altura das unidades. Em média, considerando as três direções

ortogonais, a velocidade transversal foi aproximadamente 60,9% da velocidade longitudinal (Figura 3.17b). Esta relação foi muito próxima daquilo que Mehta e Monteiro (2008) comentam para as propriedades do concreto, de aproximadamente 61,2%.

Figura 3.17 – Relação entre as velocidades longitudinais e transversais



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Comportamento anisotrópico dos blocos cerâmicos

Considerando a metodologia realizada na avaliação ultrassônica ilustrada a Figura 3.7, segundo a orientação dos três eixos ortogonais, os ensaios realizados permitiram a obtenção das velocidades longitudinais V_{11} , V_{22} e V_{33} , oriundas das ondas propagadas ao longo da altura, comprimento e largura, respectivamente. Além disso, também foi possível a obtenção das velocidades V_{12} , V_{21} e V_{31} , oriundas das ondas transversais polarizadas na direção do comprimento (quando propagadas ao longo da altura) e na direção da altura (quando propagadas na direção do comprimento e da largura).

Mediante forte tendência ao comportamento de isotropia transversal para os elementos, as constantes elásticas C_{11} , C_{22} , C_{33} e C_{66} foram calculadas a partir das equações de Christoffel descritas no item 2.2 e foram apresentadas na Tabela 3.10. Conforme comentado anteriormente, materiais com isotropia transversal com relação ao plano 2-3, ou seja, o plano da seção transversal, apresentam equivalência entre as constantes elásticas $C_{22} = C_{33}$ e $C_{55} = C_{66}$. Para obtenção da constante C_{55} seriam necessárias as velocidades V_{31} (Ondas propagadas ao longo da largura e polarizadas na direção da altura) e V_{13} (Ondas propagadas ao longo da altura e polarizadas na direção da largura), entretanto, esta última não foi obtida neste trabalho, tendo em vista que as ondas propagadas ao longo da altura tiveram o comprimento como sua direção de polarização.

Tabela 3.10 – Constantes elásticas dos blocos cerâmicos

Série	Constantes elásticas (GPa)			
	C ₁₁	C ₂₂	C ₃₃	C ₆₆
Série I	19,61 (5,45)	14,68 (5,17)	13,51 (5,98)	5,88 (5,37)
Série II	19,94 (4,34)	14,59 (3,52)	14,06 (6,48)	6,10 (2,64)
Série III	23,09 (9,56)	18,56 (13,03)	16,79 (10,48)	7,09 (7,66)

* Os resultados entre parênteses referem-se aos coeficientes de variação (em %).

Fonte: Autoria própria.

Dadas as constantes elásticas, com o objetivo de verificar a compatibilidade entre as constantes C₂₂ e C₃₃ e a divergência entre estas duas constantes em relação a C₁₁, os testes estatísticos F e T foram empregados comparando ambas as constantes para cada uma das séries e seguem apresentadas na Tabela 3.11. Perante o exposto, observa-se que para todas as séries analisadas, as constantes elásticas C₂₂ e C₃₃ mostraram-se significativamente diferentes à constante elástica C₁₁, confirmando a hipótese de divergência entre os resultados. Por outro lado, na comparação entre as constantes elásticas C₂₂ e C₃₃, observou-se que ambas não apresentaram diferenças estatísticas significativas (exceto para a série I), confirmando a hipótese de igualdade entre essas duas constantes.

Tabela 3.11 - Teste de hipóteses estatístico para as constantes elásticas dos blocos

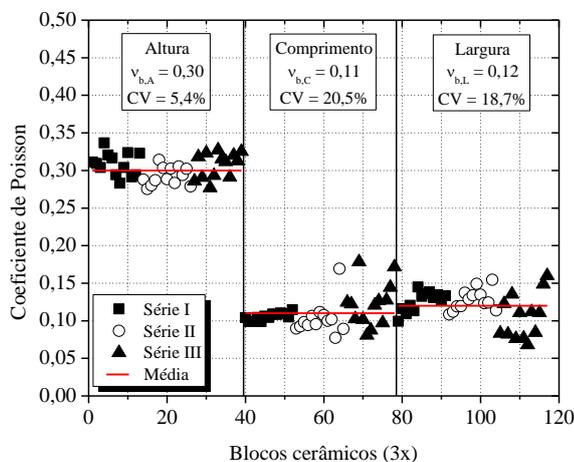
Série	Comparação		T	T _{crit}	p-value	Significância
Série I	C ₁₁	C ₂₂	13,538	2,391	9,91x10 ⁻¹³	Sim
	C ₁₁	C ₃₃	16,397	2,391	1,54x10 ⁻¹⁴	Sim
	C ₂₂	C ₃₃	3,806	2,391	0,08x10 ⁻²	Sim
Série II	C ₁₁	C ₂₂	4,983	2,391	4,34x10 ⁻⁵	Sim
	C ₁₁	C ₃₃	8,047	2,391	2,84x10 ⁻⁸	Sim
	C ₂₂	C ₃₃	2,137	2,391	0,086	Não
Série III	C ₁₁	C ₂₂	19,131	2,391	4,89x10 ⁻¹⁶	Sim
	C ₁₁	C ₃₃	16,868	2,391	8,22x10 ⁻¹⁵	Sim
	C ₂₂	C ₃₃	1,848	2,391	0,077	Não

Fonte: Autoria própria.

A partir da relação entre as velocidades longitudinais e transversais apresentada na Equação 2.15 para materiais isotrópicos, o coeficiente de Poisson para cada um dos blocos cerâmicos foi analisado segundo os três eixos ortogonais, como ilustrado na Figura 3.18. É importante mencionar que este Poisson é apenas uma estimativa, tendo em vista que a equação utilizada só pode ser aplicada aos materiais isotrópicos. Entretanto, de maneira clara, observa-se uma diferença substancial entre os coeficientes de Poisson obtidos para a direção da altura e aqueles verificados para o comprimento e a largura. Enquanto para o primeiro caso

os blocos apresentaram um coeficiente de Poisson médio de aproximadamente 0,30, para as direções do comprimento e da largura estes resultados foram de apenas 0,11 e 0,12.

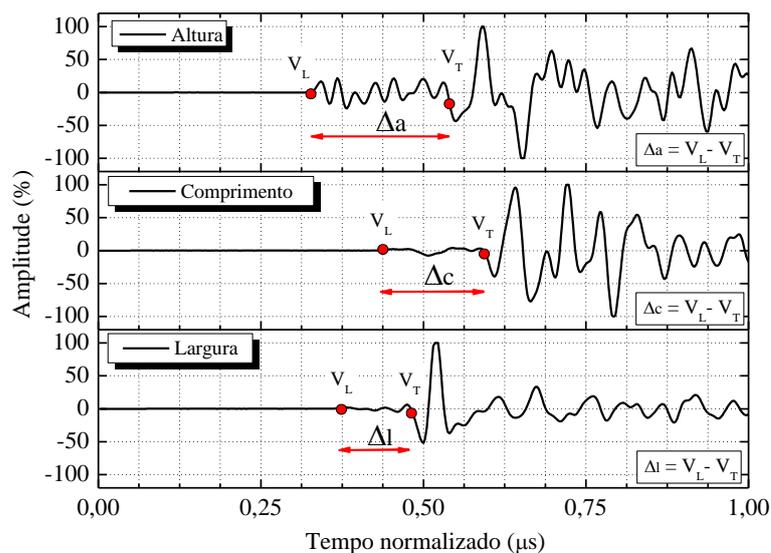
Figura 3.18 – Estimativa do coeficiente de Poisson obtido para os blocos cerâmicos



Fonte: Autoria própria.

Para um melhor entendimento desta variação, a Figura 3.19 apresenta os sinais típicos ultrassônicos para cada uma das direções ortogonais e possibilita a visualização da diferença (Δ_i) entre o tempo de chegada correspondente às ondas longitudinais e transversais. Como as medições foram realizadas ao longo de diferentes distâncias (19 cm para a altura, 29 cm para o comprimento e 14 cm para a largura), o tempo no eixo das abscissas foi normalizado para propiciar que os sinais ultrassônicos fossem visualizados em uma mesma escala de tempo.

Figura 3.19 – Defasagem entre o tempo de chegada das ondas longitudinais e transversais conforme as direções ortogonais



Fonte: Autoria própria.

Assim, ao analisar estes sinais, observa-se que embora a velocidade longitudinal na direção da altura seja maior (menor tempo de chegada), há uma maior defasagem Δ_a entre as

velocidades longitudinal e transversal, ocasionando em um aumento no coeficiente de Poisson para esta direção, uma vez que esta diferença influencia diretamente no cálculo do coeficiente. Isto ocorre porque as ondas longitudinais desta direção apresentam maiores velocidades longitudinais, uma vez que são propagadas na direção da altura do bloco, entretanto, as ondas transversais são aquelas que apresentam os menores valores de velocidade, uma vez que naturalmente não são polarizadas na direção da altura. Por outro lado, embora as velocidades longitudinais ao longo do comprimento e da largura sejam inferiores, estas apresentam ondas transversais que são polarizadas na direção da altura do bloco e, portanto, apresentam um tempo de chegada menor e conseqüentemente uma velocidade maior, reduzindo a defasagem Δ_c e Δ_l para os casos do comprimento e da largura, respectivamente.

Avaliando de maneira estatística estes resultados do coeficiente de Poisson através dos testes F e T, observa-se mais uma vez a partir da Tabela 3.12 que em todas as séries analisadas, houveram diferenças significativas entre os resultados obtidos para a direção da altura ($v_{b,A}$) em relação aos demais obtidos para as direções do comprimento e da largura ($v_{b,C}$ e $v_{b,L}$, respectivamente). Entretanto, neste caso ao comparar os resultados entre os coeficientes $v_{b,C}$ e $v_{b,L}$, apenas a série III apontou uma similaridade estatística entre os dois.

Tabela 3.12 – Teste de hipóteses estatístico para o coeficiente de Poisson dos blocos

Série	Comparação		T	T_{crit}	p -value	Significância
Série I	$v_{b,A}$	$v_{b,C}$	45,477	2,391	$8,41 \times 10^{-25}$	Sim
	$v_{b,A}$	$v_{b,L}$	32,480	2,391	$2,39 \times 10^{-21}$	Sim
	$v_{b,C}$	$v_{b,L}$	5,183	2,391	$2,61 \times 10^{-5}$	Sim
Série II	$v_{b,A}$	$v_{b,C}$	27,347	2,391	$1,34 \times 10^{-19}$	Sim
	$v_{b,A}$	$v_{b,L}$	32,302	2,391	$2,72 \times 10^{-21}$	Sim
	$v_{b,C}$	$v_{b,L}$	3,469	2,391	0,0019	Sim
Série III	$v_{b,A}$	$v_{b,C}$	19,527	2,391	$3,08 \times 10^{-16}$	Sim
	$v_{b,A}$	$v_{b,L}$	21,164	2,391	$4,94 \times 10^{-17}$	Sim
	$v_{b,C}$	$v_{b,L}$	1,418	2,391	0,169	Não

Fonte: Autoria própria.

Apesar dos coeficientes de variação da ordem de 20% para os coeficientes de Poisson obtidos para as direções do comprimento e da largura, esta estimativa mostrou-se satisfatória tendo em vista a grande dificuldade para obtenção dos mesmos através de ensaios mecânicos tradicionais. Considerando um coeficiente de Poisson dado pela média entre os resultados apresentados para cada uma das direções, os blocos cerâmicos apresentaram um coeficiente de Poisson médio igual a 0,177, com coeficiente de variação de 8,62%. Este valor é ligeiramente superior ao coeficiente de Poisson 0,15 indicado pela ABNT NBR 16868-1:2020

para blocos cerâmicos estruturais, apontando uma coerência entre estes resultados. Neste sentido, é razoável que o coeficiente de Poisson dinâmico obtido através dos ensaios ultrassônicos realmente seja superior àqueles aferidos através dos ensaios estáticos, uma vez que os ensaios dinâmicos correspondem a um pequeno nível de mobilização das deformações em uma curva tensão x deformação, enquanto as propriedades calculadas através dos ensaios estáticos são obtidas utilizando um trecho da curva onde o material usualmente já apresenta um certo nível de danificação.

No tocante ao comportamento do material, a partir da análise das velocidades de pulso ultrassônico, das constantes elásticas e dos coeficientes de Poisson estimados, observou-se o comportamento transversalmente isotrópico dos blocos cerâmicos em relação ao plano da seção transversal destas unidades, ou seja, sendo a direção da altura aquela que apresenta o eixo de isotropia.

Este comportamento também já foi relatado em outros trabalhos para os tijolos cerâmicos e a justificativa é de que a direção de extrusão do material é substancialmente diferente das demais pelo próprio processo com que isto é realizado, conforme discutido anteriormente. Em análise realizada por Lourenço *et al.* (2010), foi observado um comportamento anisotrópico de unidades vazadas de alvenaria, cuja direção mais resistente avaliada foi justamente a direção paralela aos furos. Após um estudo experimental analisando tijolos cerâmicos extrudados e moldados à mão, Cabané *et al.* (2022) também notou uma anisotropia moderada nos elementos extrudados, que por sua vez também apresentaram uma maior resistência ao longo da direção perpendicular ao plano extrudado. Tal comportamento também foi relatado para outras propriedades térmicas e mecânicas de tijolos cerâmicos extrudados em Korah *et al.* (2016), Bourret *et al.* (2015) e Maillard e Aubert (2014).

É importante mencionar que tal comportamento inviabiliza a aplicação das Equações 2.13 e 2.14 para a obtenção dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal dinâmicos dos blocos cerâmicos, uma vez que estas equações são aplicadas para materiais considerados homogêneos e isotrópicos. Neste sentido, a obtenção dessas propriedades não foi realizada neste trabalho, uma vez que os ensaios experimentais para obtenção de todas as constantes elásticas necessárias para tal, não foram contemplados no programa experimental, que por sua vez foi realizado anteriormente à realização da análise de dados.

Apesar da impossibilidade de aplicação de tais equações para obtenção das propriedades dinâmicas, estas já foram utilizadas em alguns trabalhos e apresentaram algumas divergências consideráveis. Makoond *et al.* (2019) observou que as propriedades dinâmicas de tijolos cerâmicos extrudados obtidas através das equações de isotropia apresentaram

diferenças de 25% a 41% daquelas obtidas por meio de ensaios dinâmicos de vibração por impulso. Neste mesmo contexto, Sombra (2020) empregou as mesmas relações para estimar as propriedades dinâmicas de blocos cerâmicos com paredes vazadas e o módulo de elasticidade dinâmico divergiu em até 24,2% dos resultados obtidos através de ensaios não destrutivos de ressonância acústica. Assim, questiona-se a coerência dos resultados obtidos por meio do ultrassom com aplicação das equações que consideram o material como isotrópico e homogêneo, tendo em vista que estes outros ensaios, embora considerem a isotropia nas relações entre frequência e propriedades elásticas, possuem uma metodologia que considera um comportamento mais global do corpo de prova.

De posse do comportamento transversalmente isotrópico dos blocos cerâmicos, uma estimativa do grau de anisotropia das unidades pode ser realizada pela ASTM D2845-05 (2005) que apresenta a Equação 3.8 para obtenção da anisotropia Δ_M de rochas anisotrópicas. Essa relação também já foi empregada nas unidades de alvenaria por Noor-E-Khuda e Albermani (2019) e Vasanelli *et al.* (2017).

$$\Delta_M = \left(\frac{V_{Lb,máx} - V_{Lb,mín}}{V_{Lb,máx}} \right) \times 100 \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde:

Δ_M é o grau de anisotropia dos blocos cerâmicos (em %);

$V_{Lb,máx}$ é a velocidade longitudinal máxima ao longo do bloco;

$V_{Lb,mín}$ é a velocidade longitudinal mínima ao longo do bloco.

Além do grau de anisotropia, também é possível verificar a propriedade de resistência anisotrópica ($R_{\Delta M}$) a partir da relação descrita na Equação 3.9, que funciona como um parâmetro de qualidade das unidades de alvenaria como indicado por Araújo *et al.* (2020) e Kasinikota e Tripura (2021).

$$R_{\Delta M} = \frac{f_b}{\Delta_M} \quad \text{Equação 3.9}$$

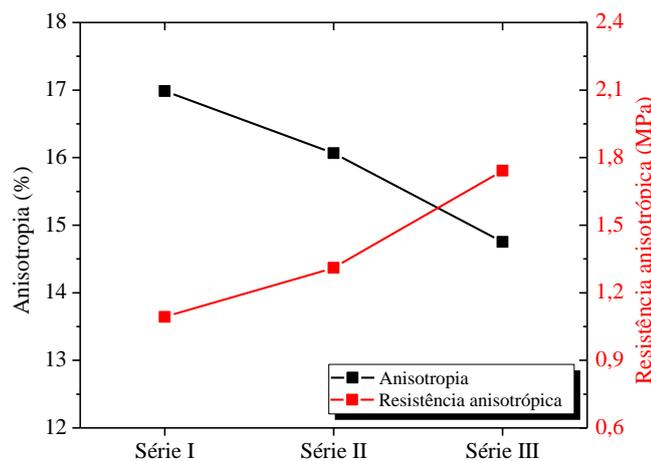
Onde:

$R_{\Delta M}$ é a resistência anisotrópica dos blocos cerâmicos (em MPa);

f_b é a resistência à compressão dos blocos cerâmicos (em MPa).

A Figura 3.20 indica a variação destes dois parâmetros para as três diferentes séries avaliadas. Observa-se que os parâmetros se relacionam de maneira inversa, ou seja, a redução do grau de anisotropia das unidades cerâmicas provoca um aumento natural na resistência anisotrópica das unidades.

Figura 3.20 – Variação dos parâmetros de anisotropia segundo a série dos blocos



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 3.13, onde os valores dos parâmetros de anisotropia são expressos, nota-se que o grau de anisotropia dos blocos cerâmicos foi de aproximadamente 14% a 17%, sendo maior na série de menor resistência. Enquanto isso, a resistência anisotrópica variou de 1,09 a 1,74 MPa. Apesar da proximidade entre os resultados, os testes estatísticos indicaram diferenças significativas entre os parâmetros, exceto para a comparação entre o grau de anisotropia das séries I e II. Dessa forma, é possível observar ainda que o grau de anisotropia das unidades da série III foi cerca de 13% menor do que aquele da série I, que por sua vez apresentou a maior anisotropia. Por outro lado, a resistência anisotrópica das unidades da série III foi quase 60% superior em relação à série de menor resistência.

Tabela 3.13 - Parâmetros de anisotropia dos blocos cerâmicos

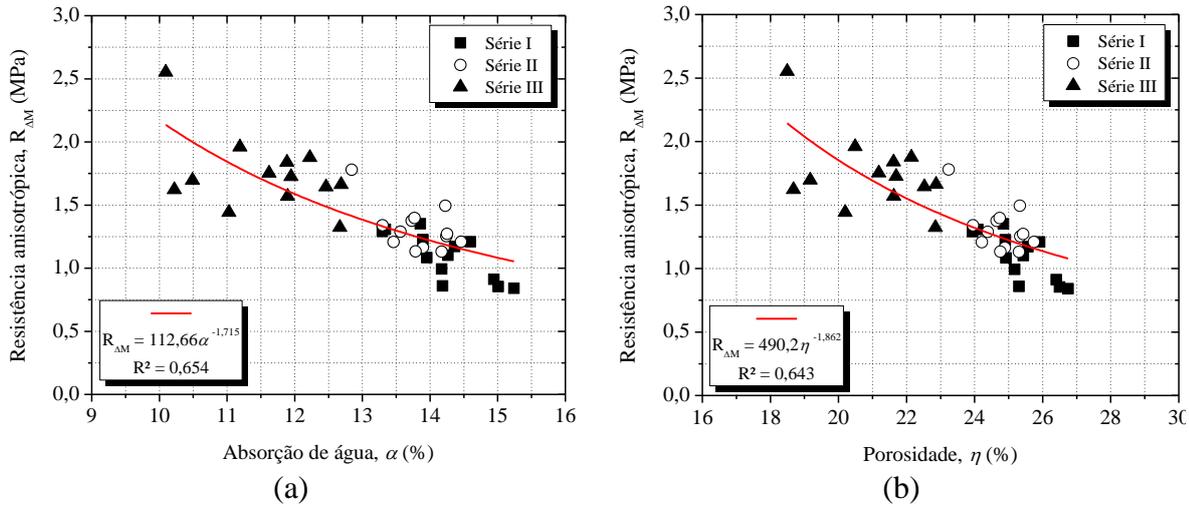
Série	Parâmetros de anisotropia	
	Δ_M (%)	$R\Delta_M$ (MPa)
Série I	16,98 (7,72)	1,09 (16,87)
Série II	16,06 (6,66)	1,31 (13,54)
Série III	14,75 (6,63)	1,74 (17,04)

* Os resultados entre parênteses referem-se aos coeficientes de variação (em %).

Fonte: Autoria própria.

Apesar do aumento da resistência anisotrópica conforme elevação da resistência mecânica dos blocos cerâmicos, a partir de relações teóricas se observou que este parâmetro tem uma maior correlação com as propriedades físicas do material e não com as suas propriedades mecânicas. A Figura 3.21 indica uma redução deste parâmetro de anisotropia em decorrência do aumento da absorção de água e da porosidade dos blocos cerâmicos. Tal fato justifica-se basicamente porque a elevação de ambas as propriedades físicas aumenta o índice de vazios do material, o que acarreta negativamente na homogeneidade e resistência das unidades cerâmicas.

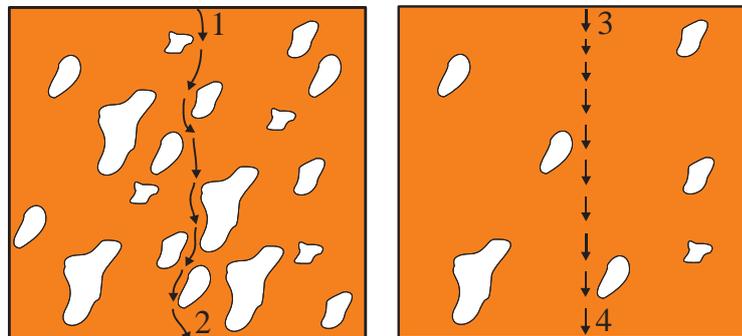
Figura 3.21 – Variação da resistência anisotrópica com (a) absorção de água e (b) porosidade



Fonte: Autoria própria.

O impacto dos vazios na velocidade de pulso ultrassônico pode ser melhor visualizado através da Figura 3.22. Observa-se que a presença dos vazios dificulta a propagação das ondas ultrassônicas, uma vez que as mesmas precisam percorrer um meio contínuo mais longo, impactando negativamente no tempo de percurso da onda e na sua velocidade de propagação.

Figura 3.22 – Impacto dos vazios na velocidade de pulso ultrassônico



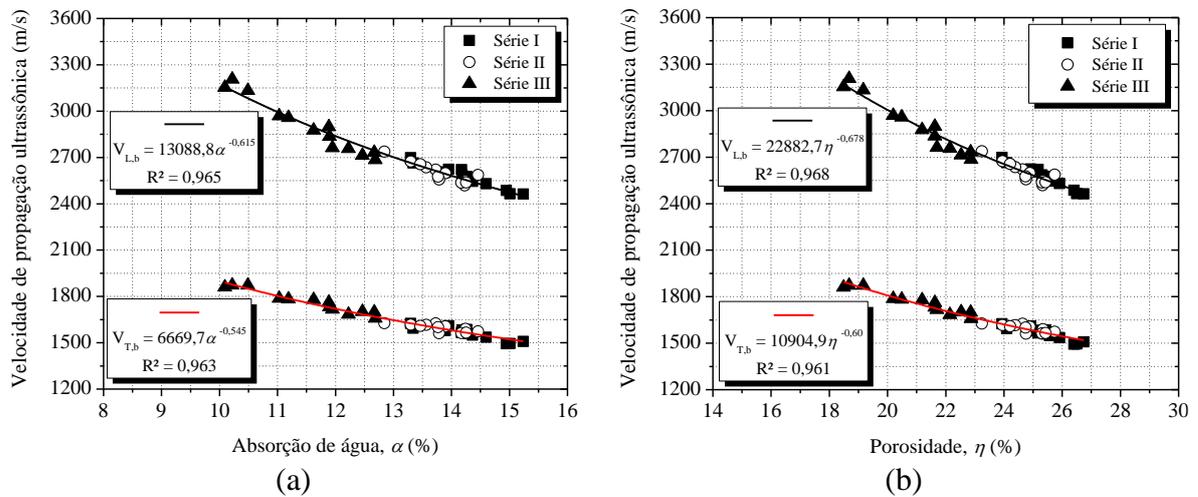
$$V_p(3-4) > V_p(1-2)$$

Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Relação entre VPU e as propriedades físico-mecânicas

A influência direta das propriedades físicas sobre a velocidade de pulso ultrassônico do bloco cerâmico também pode ser observada através das relações diretas obtidas entre ambas as propriedades, conforme ilustrado na Figura 3.23. Em ambos os casos, nota-se uma elevação da velocidade de propagação ultrassônica conforme redução da absorção de água e porosidade do material, que refletem a diminuição no índice de vazios do material, conforme comentado anteriormente.

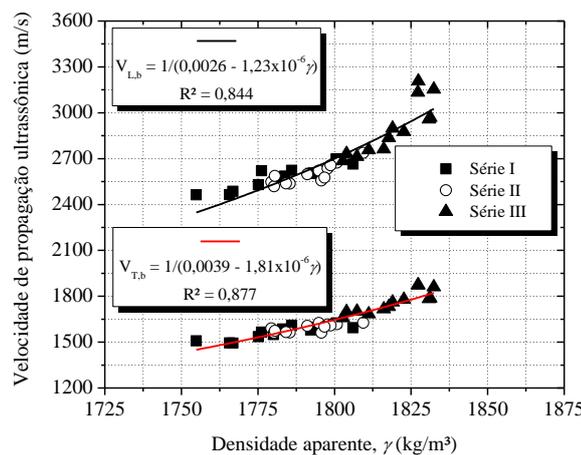
Figura 3.23 – Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e transversal com (a) absorção de água e (b) porosidade



Fonte: Autoria própria.

Naturalmente, o aumento do índice de vazios do material ocasiona uma redução na densidade do mesmo e por sua vez na própria velocidade de propagação ultrassônica, conforme ilustra a Figura 3.24. Este comportamento das propriedades físicas em função da VPU também foi observado experimentalmente por Özkan e Yayla (2016) na avaliação de tijolos cerâmicos e por Kasinikota e Tripura (2022) na investigação de blocos de terra estabilizada para uso na alvenaria.

Figura 3.24 – Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e transversal com a densidade dos blocos cerâmicos



Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos para as propriedades mecânicas, observou-se uma relação discreta destas propriedades com a velocidade de pulso ultrassônico obtida durante a avaliação não destrutiva. A Equação 3.10 apresenta uma relação potencial entre a velocidade de pulso longitudinal e a resistência à compressão dos blocos cerâmicos, que por sua vez apresentou um coeficiente de determinação de apenas 0,612.

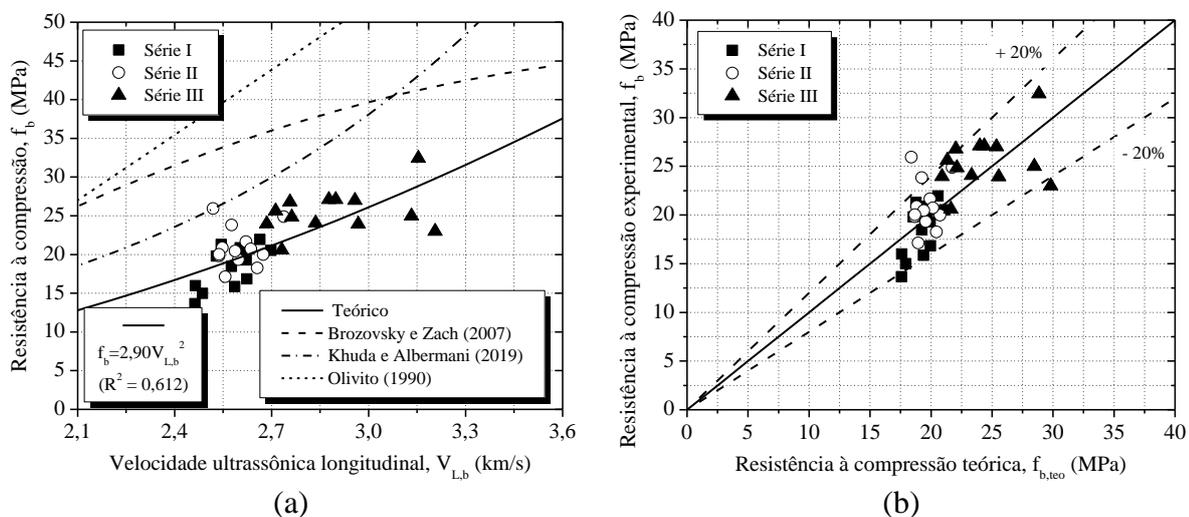
$$f_b = 2,90V_{L,b}^2 \quad \text{Equação 3.10}$$

Na Figura 3.25a essa relação foi comparada com expressões propostas por outros trabalhos experimentais realizados em tijolos cerâmicos, onde pôde-se perceber uma menor relação entre os resultados de VPU e resistência do que aqueles obtidos para os tijolos. Apesar do baixo coeficiente de determinação, a Figura 3.25b indica uma correlação razoável entre os resultados de resistência teóricos estimados a partir da equação, com aqueles obtidos experimentalmente através dos ensaios mecânicos destrutivos, com representação dos resultados segundo uma margem de erro de $\pm 20\%$.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade estático, este pode ser obtido através da velocidade de pulso ultrassônico por meio da Equação 3.11. De maneira similar à resistência à compressão, esta expressão apresentou um coeficiente de determinação de apenas 0,583.

$$E_{s,b} = 0,70V_{L,b}^{3,15} \quad \text{Equação 3.11}$$

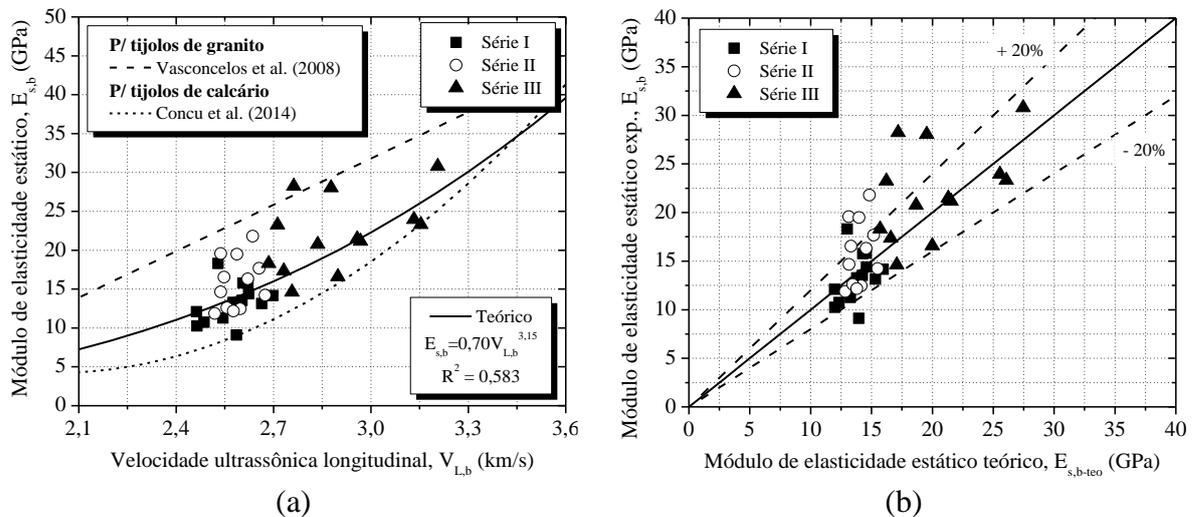
Figura 3.25 – Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e a resistência à compressão dos blocos cerâmicos



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 3.26, o módulo de elasticidade estático obtido experimentalmente foi confrontado com a previsão teórica. Além disso, na ausência de trabalhos com expressões similares para o material cerâmico, a equação 3.8 mostrou-se satisfatória quando comparada com as relações apresentadas por Vasconcelos *et al.* (2008) desenvolvida para tijolos de granito e Concu *et al.* (2014) idealizada para tijolos de calcário, ambos para utilização em alvenaria de pedra.

Figura 3.26 - Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico longitudinal e o módulo de elasticidade estático dos blocos cerâmicos



Fonte: Autoria própria.

De modo geral, observou-se que um aumento na velocidade ultrassônica longitudinal também ocasionou uma elevação nas propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático. Para ambos os casos, notou-se que a maior dificuldade em se relacionar tais propriedades está ligada à própria variabilidade da alvenaria e também à natureza dos dois tipos de ensaios. Os ensaios mecânicos procuram avaliar o comportamento global do elemento e são fortemente influenciados por diversos fatores, como a concentração de tensões em saliências, cantos e reentrâncias da seção transversal do bloco, bem como pelo confinamento oferecido pelo atrito com as placas de apoio e a própria geometria irregular do corpo de prova, que por sua vez culminam em resultados com elevados coeficientes de variação em relação àqueles obtidos através dos ensaios ultrassônicos.

Entretanto, apesar das maiores dificuldades impostas pelo ensaio mecânico destrutivo, a maior dificuldade em se relacionar tais propriedades diz respeito ao fato de que a VPU representa uma propriedade do material cerâmico que compõe o bloco, enquanto a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático obtidos da maneira destrutiva tradicional não estão atrelados propriamente ao material cerâmico, mas sim à estrutura do bloco. Nesse sentido, Barbosa (2008) fez uma série de discussões a respeito da distribuição de tensões e deformações em blocos de alvenaria durante os ensaios mecânicos destrutivos e pôde-se perceber que a estrutura do bloco, por sua vez formada por paredes, septos e vazios, influencia diretamente na distribuição de tensões ao longo da seção transversal. Desse modo, a tensão atuante durante o ensaio não se mantém constante em todos os pontos da seção transversal e os resultados mecânicos obtidos dizem mais respeito ao comportamento global

da estrutura do bloco do que propriamente ao comportamento do material que compõe o bloco.

3.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, realizou-se a apresentação e descrição da primeira etapa do programa experimental que teve como objetivo realizar a caracterização e avaliação ultrassônica de blocos cerâmicos de alvenaria estrutural. Dessa forma, três diferentes séries de blocos variando a sua resistência à compressão foram utilizados.

Inicialmente as unidades foram avaliadas quanto às suas propriedades físicas e mecânicas para obtenção de informações quanto à absorção de água, porosidade, densidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade estático. Nestas mesmas unidades cerâmicas, realizou-se uma avaliação ultrassônica não destrutiva para obtenção das velocidades de pulso ultrassônico longitudinal e transversal ao longo das direções ortogonais dos blocos.

De maneira geral, a VPU dos blocos sofreu uma variação positiva para séries de blocos mais rígidos e resistentes, bem como para unidades que apresentaram baixos índices de absorção de água e porosidade, e elevada densidade. Além disso, verificou-se uma flutuação significativa nos valores dessas velocidades ultrassônicas ao longo das três direções do bloco. Dessa forma, a partir da análise das próprias velocidades, das constantes elásticas e do coeficiente de Poisson estimado, identificou-se um comportamento transversalmente isotrópico para tais blocos, sendo a direção de extrusão dos blocos (ou seja, da altura) aquela que apresenta a direção de isotropia.

Posteriormente, relações empíricas foram propostas e comparadas com expressões da literatura para avaliar a relação entre a VPU e as propriedades físico-mecânicas dos blocos cerâmicos, observando boas correlações com as propriedades físicas e relações discretas com as propriedades mecânicas obtidas através dos ensaios destrutivos tradicionais.

4 CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO ULTRASSÔNICA SEM TENSÃO: PRISMAS DE ALVENARIA

Neste capítulo foi descrita a segunda etapa do programa experimental desenvolvido no trabalho, que consistiu na caracterização e avaliação ultrassônica em prismas de alvenaria livres de tensão. De maneira geral, realizou-se a caracterização físico-mecânica das argamassas de assentamento utilizadas durante a confecção dos prismas, que por sua vez foram confeccionados com geometria de dois e três blocos, utilizando as mesmas séries de unidades cerâmicas apresentadas no capítulo anterior. Para avaliação do comportamento mecânico dos prismas de alvenaria estrutural, os corpos de prova foram submetidos a ensaios não destrutivos ultrassônicos para obtenção da velocidade de pulso ultrassônico e em seguida a ensaios mecânicos destrutivos para avaliação de sua resistência à compressão e módulo de elasticidade estático.

No que diz respeito aos ensaios não destrutivos, estes foram realizados por meio de medidas diretas em diferentes pontos distribuídos na seção transversal dos prismas, enquanto as argamassas foram avaliadas através das medidas diretas em um único ponto localizado na face dos seus respectivos corpos de prova cilíndricos. Além disso, a partir dos resultados obtidos nos blocos cerâmicos e na argamassa de assentamento, um modelo teórico foi proposto para avaliação das propriedades mecânicas dos prismas através da velocidade de pulso ultrassônico de cada um dos seus materiais constituintes.

4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este item discorrerá sobre as principais propriedades dos materiais empregados nos prismas e apresentará a metodologia utilizada para caracterização das propriedades físicas e mecânicas das argamassas de assentamento e dos prismas de alvenaria, bem como a metodologia empregada para avaliação ultrassônica nestes elementos. Salienta-se neste ponto que, para todas as amostras de argamassas ou prismas, com as suas respectivas propriedades

físicas ou mecânicas, foram aplicados os testes estatísticos de Shapiro e Wilk (1965) para avaliação da distribuição normal das amostras, com posterior aplicação do teste de Grubbs (1969) para identificação e retirada de valores espúrios das amostras.

4.1.1 Argamassas de assentamento

Para confecção das argamassas de assentamento aplicada na construção dos prismas avaliados neste trabalho, utilizaram-se dois aglomerantes, o cimento e a cal. Em particular, empregou-se cimento Portland composto CP II-F classe 32 da Holcim Cimentos® e cal hidratada CH III da Itaú®.

Para avaliação do consumo dos materiais e melhor controle durante a produção das argamassas a partir dos traços em massa, realizaram-se ensaios para obtenção das massas específica e unitária para ambos os materiais. A massa específica foi obtida seguindo os critérios da ABNT NBR 16605:2017 através da disposição de uma massa conhecida do material em um frasco volumétrico de Le Chantelier preenchido com querosene. A massa unitária foi determinada segundo as prescrições da ABNT NBR NM 45:2006 a partir da relação entre a massa não compactada do material e o volume conhecido de um recipiente metálico preenchido. A Tabela 4.1 apresenta os resultados destas propriedades.

Tabela 4.1 – Propriedades físicas dos aglomerantes

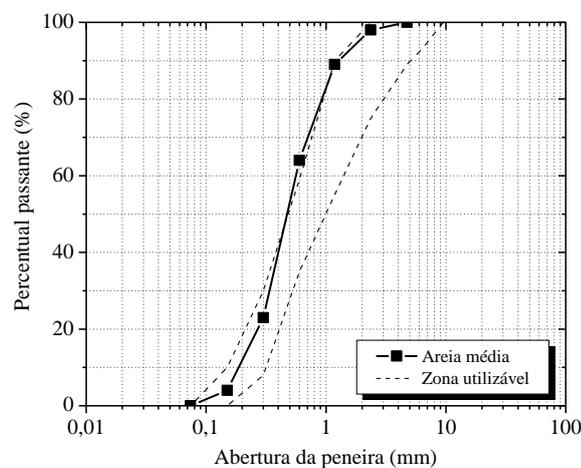
Propriedade	Cimento CP II-F	Cal CH III
Massa específica (kg/m ³)	2966,6	2467,8
Massa unitária (kg/m ³)	1170,0	876,7

Fonte: Autoria própria.

Na composição das argamassas foram utilizados agregados miúdos que se resumiram a areias naturais com granulometria média. De modo análogo ao realizado com os aglomerantes, as propriedades físicas dos agregados foram adquiridas por meio de ensaios das massas específica e unitária. Respectivamente, ambas foram obtidas de acordo com as recomendações da ABNT NBR NM 52:2009 e ABNT NBR NM 45:2006. Além disso, a ABNT NBR NM 248:2003 possibilitou a avaliação da distribuição granulométrica através das curvas apresentadas na Figura 4.1, e pela determinação da dimensão máxima do agregado, sendo esta correspondente à abertura da malha em que a porcentagem retida acumulada é imediatamente inferior a 5%, e o módulo de finura, caracterizado pela soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal dividida por 100, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Devido à ausência de uma normatização nacional que regularize a composição das argamassas de assentamento para elementos de alvenaria estrutural, as argamassas utilizadas no assentamento dos prismas de alvenaria estrutural foram definidas e adaptadas a partir de traços disponíveis na literatura técnica (Haach *et al.*, 2011; Nalon *et al.*, 2021; Parsekian *et al.*, 2014), conforme a resistência à compressão dos blocos cerâmicos estimada pela fábrica. Dessa forma, empregou-se três traços de argamassa medidos em massa de cimento, cal e areia, sendo cada um deles utilizado para a produção de prismas com blocos cerâmicos das séries I, II e III, respectivamente.

Figura 4.1 – Distribuição granulométrica da areia



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.2 – Propriedades físicas da areia

Propriedade	Areia média
Massa específica (kg/m ³)	2530,0
Massa unitária (kg/m ³)	1593,3
Dimensão máxima característica (mm)	2,36
Módulo de finura	2,23

Fonte: Autoria própria.

O preparo da argamassa foi realizado com o auxílio de um misturador mecânico de eixo vertical que assegurasse uma mistura homogênea de todos os materiais, de acordo com o recomendado pela ABNT NBR 16868-2:2020 e a mistura da argamassa foi realizada conforme prescrito pela ABNT NBR 16541:2016.

A argamassa foi caracterizada em seu estado fresco para verificação do índice de consistência seguindo as recomendações da ABNT NBR 13576:2016. Assim, para realização do ensaio e obtenção da consistência adequada para a mistura, utilizou-se uma mesa manual para ensaio de consistência, um molde tronco cônico, um soquete e uma régua metálica com resolução de 1,0 mm. Para obtenção da consistência adequada para o assentamento das

unidades cerâmicas foi necessária a utilização de relações água/cimento diferentes para cada traço, resultando em índices médios de consistência entre 220 e 230 mm, por sua vez obtidos a partir da média de três registros realizados em diferentes pontos da mistura, conforme ilustrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Ensaio para obtenção do índice de consistência da argamassa



Fonte: Autoria própria.

A partir disso, a composição da argamassa foi fixada para utilização em todas as outras etapas deste trabalho e confecção dos elementos de alvenaria estrutural. A Tabela 4.3 indica as principais características da argamassa utilizada.

Tabela 4.3 – Composição das argamassas de assentamento

Argamassa	Traço em massa (cimento:cal:areia)	Índice de consistência (mm)	Relação água/cimento
Série I	1:0,25:4,22	230,0	0,87
Série II	1:0,22:3,80	221,0	0,76
Série III	1:0,20:3,39	224,0	0,66

Fonte: Autoria própria.

Para caracterização das argamassas nos estados físico e endurecido foram realizados ensaios para obtenção da absorção de água, porosidade, densidade aparente, densidade específica, resistência à compressão e módulo de elasticidade estático. Além disso, ensaios ultrassônicos foram realizados para obtenção da velocidade de pulso ultrassônico, módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson dinâmicos. Embora a ABNT NBR 13279:2005 recomende a utilização de moldes prismáticos de 4,0 x 4,0 x 16,0 cm para confecção dos corpos de prova de argamassa, devido à indisponibilidade desses moldes no Laboratório de Estruturas, utilizaram-se moldes cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

O processo de moldagem dos corpos de prova foi realizado conforme a ABNT NBR 7215:2019. Os moldes foram previamente untados na superfície interna com

desmoldante e posteriormente preenchidos em quatro camadas aproximadamente iguais, cada uma recebendo 30 golpes uniformes e distribuídos com o soquete manual.

Foram confeccionados seis corpos de prova para cada série que, após 24 horas, foram desmoldados e permaneceram em câmara úmida até a realização dos ensaios. Todas as propriedades foram obtidas com aproximadamente 90 dias após o processo de moldagem dos corpos de prova de argamassa. Acrescenta-se ainda que antes da realização dos ensaios, todos os corpos de prova submeteram-se ao processo de retífica para alinhamento superficial das faces inferior e superior dos corpos de prova e foram ensaiados em seu estado seco, após um período de 24 horas sob temperaturas de $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ em estufa elétrica.

4.1.2 Prismas de alvenaria

Como parte das etapas do programa experimental deste trabalho, realizou-se a confecção dos prismas de alvenaria estrutural para avaliação do seu comportamento mecânico. Para isso, foram realizados ensaios ultrassônicos com posterior ensaio mecânico em prismas de 2 blocos com $29 \times 39\text{ cm}^2$ e prismas de 3 blocos com $29 \times 59\text{ cm}^2$, ambos com 14 cm de largura, produzidos utilizando os blocos cerâmicos e as argamassas de assentamento especificados nos itens anteriores 3.1 e 4.1.1, respectivamente. O quantitativo e especificação dos ensaios realizados seguiram as recomendações da ABNT NBR 16868-3:2020 e estão indicados na Tabela 4.4. Neste ponto, ressalta-se que os ensaios ultrassônicos em prismas de alvenaria não são normatizados e foram realizados na mesma quantidade de corpos de prova utilizada nos ensaios mecânicos.

Tabela 4.4 – Propriedades avaliadas nos prismas de alvenaria estrutural

Tipo de elemento	Propriedades obtidas	Quantidade de CPs		
		Série I	Série II	Série III
Prismas de 2 blocos	VPU, resistência à compressão e módulo de elasticidade estático	6	6	6
Prismas de 3 blocos	VPU, resistência à compressão e módulo de elasticidade estático	6	6	6

Fonte: Autoria própria.

Todos os prismas foram executados por um único operário, com auxílio de colher de pedreiro, nível e prumo, que se mantiveram verificados durante todo o processo de confecção. Em todos os corpos de prova utilizaram-se juntas de argamassamento total e argamassa de assentamento com espessura da junta igual de 10 mm.

Ademais, os prismas foram executados sobre material plástico e posteriormente armazenados sobre peças de madeira para evitar o contato com o solo. Dessa forma, todos os

corpos de prova permaneceram em condições ambientais de laboratório em todo o intervalo de tempo que ocorreu entre a confecção dos mesmos e os ensaios realizados. Quanto aos ensaios, salienta-se que todos foram realizados com idade superior a 90 dias. A Figura 4.3 ilustra a execução destes elementos.

Figura 4.3 – Execução dos prismas de alvenaria estrutural



Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Caracterização física

Os ensaios para obtenção das propriedades físicas das argamassas consistiram basicamente no emprego dos mesmos equipamentos e materiais descritos no item 3.1.2. Com o auxílio de uma balança digital, um recipiente para imersão dos corpos de prova e uma estufa com temperatura ajustável a $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, pôde-se realizar a obtenção das massas aparente, saturada e seca de todos os corpos de prova, que foram posteriormente utilizadas nas Equações 3.2 a 3.5 para o cálculo das respectivas propriedades físicas, cujos valores médios com seus respectivos coeficientes de variação estão ilustrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Propriedades físicas das argamassas de assentamento

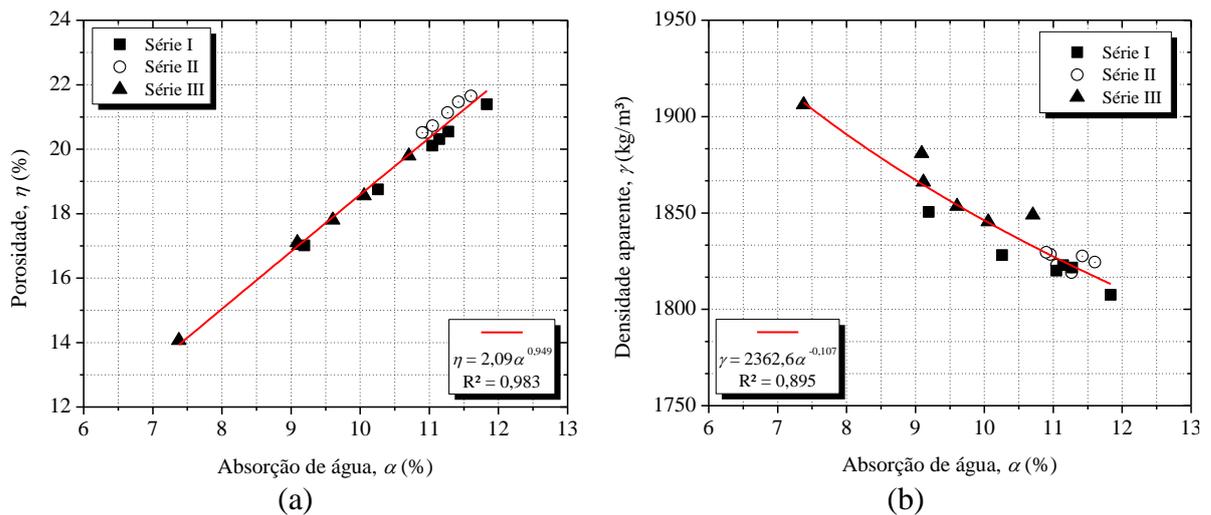
	Índice de absorção (%)	Porosidade (%)	Densidade aparente (kg/m ³)	Densidade específica (kg/m ³)
Série I				
Média	10,79	19,68	1825,13	2272,90
CV (%)	8,65	7,95	0,78	1,20
Série II				
Média	11,20	21,00	1825,34	2373,77
CV (%)	2,48	2,34	0,22	0,57
Série III				
Média	9,32	17,39	1866,90	2260,20
CV (%)	12,14	11,09	1,25	1,26

Fonte: Autoria própria

De maneira similar ao que foi observado nos blocos, relações diretas e proporcionais puderam ser obtidas através do índice de absorção das argamassas e da sua respectiva

porosidade e densidade, indicando no primeiro caso um aumento da quantidade de poros no material com a sua respectiva capacidade de absorção de água e no segundo caso uma redução da densidade do material em razão do aumento de tal absorção e consequentemente do seu índice de vazios internos, conforme apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Relações entre (a) absorção de água e porosidade e (b) absorção de água e densidade aparente nas argamassas de assentamento



Fonte: Autoria própria.

4.1.4 Caracterização mecânica

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados utilizando um equipamento servo-hidráulico Instron[®], modelo 23-200 e estrutura de compressão Emic[®] AC6.08 com capacidade nominal de 2000 kN, disponível no Laboratório de Materiais e Construção Civil da Escola de Engenharia de São Carlos (LMCC – EESC). O carregamento foi aplicado por meio de controle de deslocamento a uma velocidade de 0,01 mm/s. Para obtenção da curva tensão x deformação, foram acoplados dois *clip-gages* com 50 mm de base, posicionados em lados opostos na região média do corpo de prova, conforme a Figura 4.5.

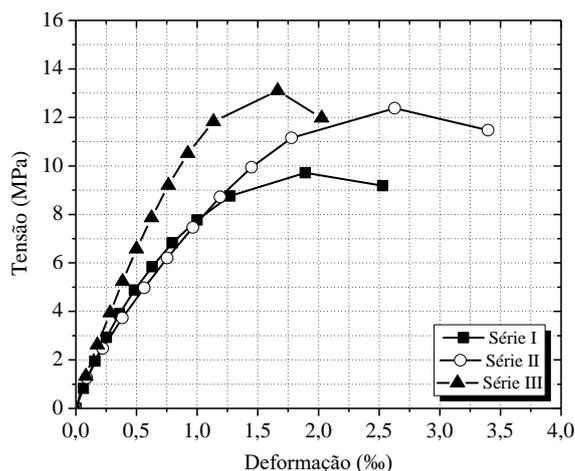
Figura 4.5 – Ensaio de resistência à compressão da argamassa de assentamento



Fonte: Autoria própria.

Após a obtenção dos diagramas tensão x deformação específicos ilustrados na Figura 4.6, o módulo de elasticidade estático das argamassas ($E_{s,a}$) foi aferido conforme as recomendações do ACI 530-11:2011 para obtenção de módulo de elasticidade secante, verificando o comportamento da curva no trecho compreendido entre 5% e 33% da tensão de ruptura.

Figura 4.6 – Diagrama tensão x deformação das argamassas de assentamento



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4.6 indica os valores médios para os resultados obtidos na caracterização mecânica das argamassas de assentamento. Como esperado pela própria composição dos traços apresentados na Tabela 4.3, argamassas com maior teor de cimento e menor relação água/cimento apresentaram uma maior resistência à compressão e módulo de elasticidade, indo ao encontro daquilo que já foi observado para os blocos cerâmicos com a elevação da resistência e rigidez destes para as séries I, II e III, respectivamente.

Tabela 4.6 – Propriedades mecânicas da argamassa de assentamento

	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade $E_{s,a}$ (GPa)
Série I		
Média	9,72	11,10
CV (%)	5,65	11,85
Série II		
Média	12,38	12,21
CV (%)	14,56	27,91
Série III		
Média	13,11	14,29
CV (%)	11,55	11,64

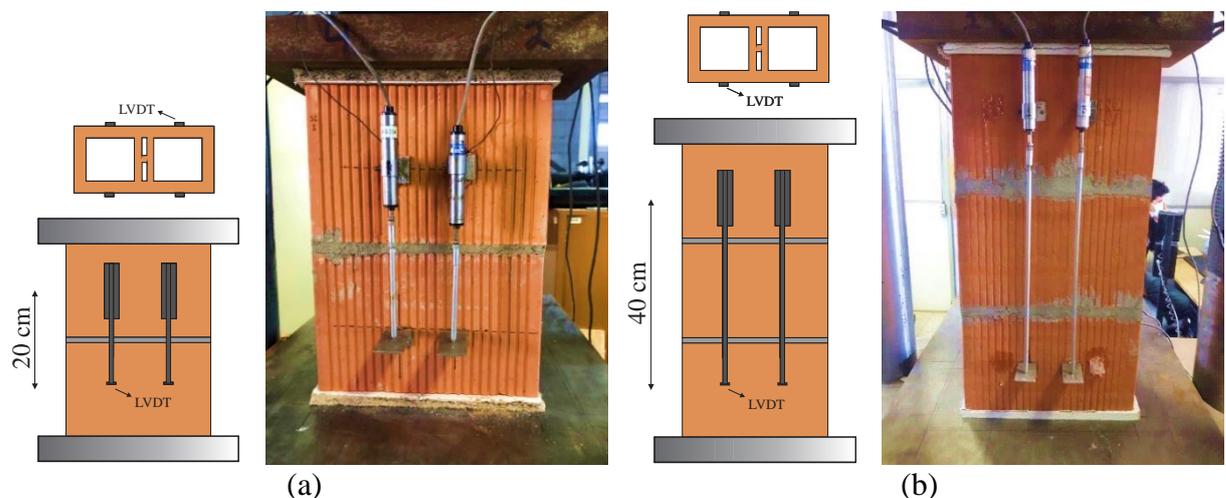
Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos da caracterização mecânica das argamassas, observa-se

que a resistência à compressão obtida se mostrou de acordo com as especificações da ABNT NBR 16868-1:2020, uma vez que permaneceu abaixo de 1,5 vezes a resistência à compressão dos blocos cerâmicos na área bruta. Entretanto, em todas as séries esta permaneceu maior do que a própria resistência do bloco, o que não é comum nas aplicações práticas do sistema em alvenaria, uma vez que prejudica a deformabilidade e acomodação de deformações por parte da própria junta e pode alterar o modo de ruptura dos elementos de alvenaria (Parsekian *et al.*, 2014). Acrescenta-se que este problema ocorreu devido às divergências entre os resultados dos ensaios mecânicos realizados neste trabalho e os resultados informados pela indústria nos blocos cerâmicos, que por sua vez foram utilizados como parâmetro para confecção das argamassas.

No tocante à caracterização mecânica dos prismas, os ensaios foram realizados seguindo as prescrições da ABNT NBR 16868-3:2020 no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE – EESC). Para obtenção da resistência à compressão, os prismas foram ensaiados em uma máquina Instron Satec[®], modelo 300 HVL, capacidade nominal de 1500 kN, com aplicação de controle de deslocamentos a uma velocidade de 0,02 mm/s e tiveram as suas faces superior e inferior regularizadas com placas de forro constituído por fibra mineral, para evitar a concentração de tensões nos principais pontos de aplicação de carregamento, conforme apresentado na Figura 4.7. Para aquisição do módulo de elasticidade, os elementos foram instrumentados com quatro transdutores de deslocamento com curso de 20 cm e 40 cm, respectivamente para os prismas de 2 e 3 blocos, posicionados simetricamente nas duas faces longitudinais dos elementos.

Figura 4.7 – Ensaio de resistência à compressão em prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos

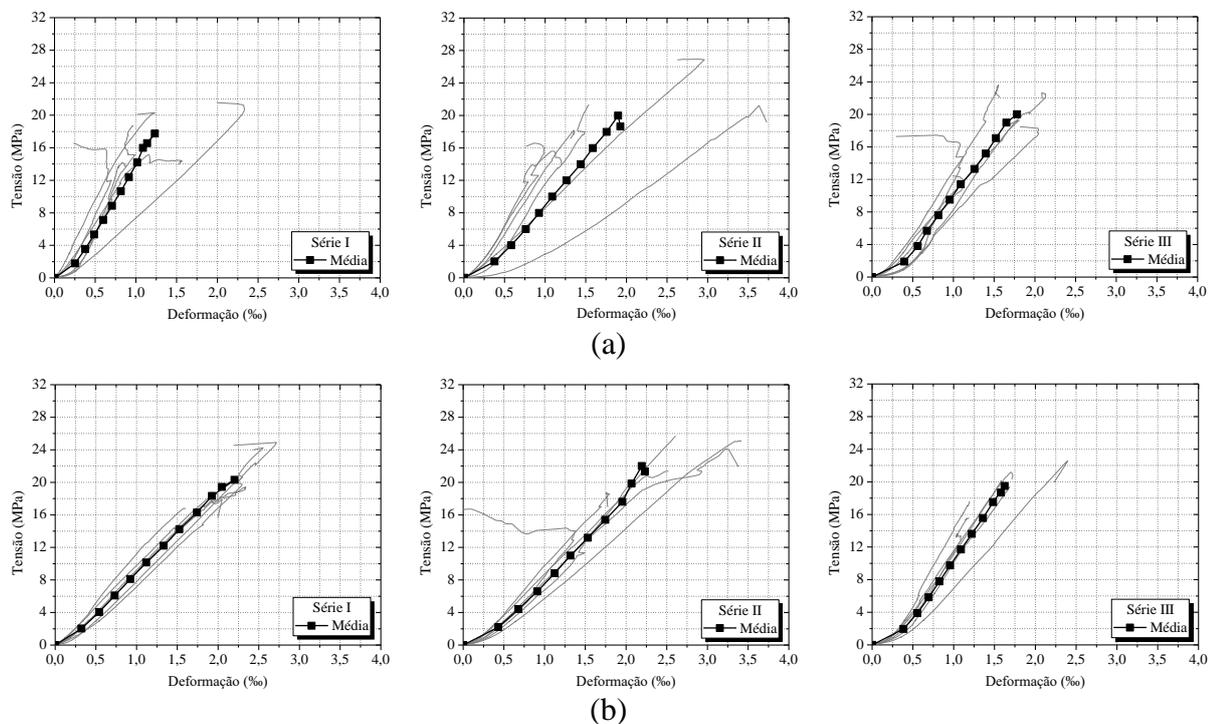


Fonte: Autoria própria.

De forma semelhante àquilo que foi realizado nos blocos e argamassas, o módulo de elasticidade dos prismas foi calculado mediante as prescrições do ACI 530-11:2011, que

recomenda o cálculo do módulo de elasticidade secante admitindo como limites no diagrama tensão x deformação, os pontos inseridos entre 5% e 33% da tensão de ruptura. A Figura 4.8 apresenta os diagramas tensão x deformação para as duas geometrias de prismas avaliadas.

Figura 4.8 – Diagramas tensão x deformação dos prismas de alvenaria das séries I, II e III: (a) prismas de 2 blocos e (b) prismas de 3 blocos



Fonte: Autoria própria.

De posse dos diagramas tensão x deformação dos prismas é possível observar que, com exceção do trecho inicial onde ocorrem as primeiras acomodações de deformação, o comportamento das curvas em todas as séries e geometrias avaliadas foi predominantemente linear, sem a presença de um trecho pós-pico. Este comportamento também já foi presenciado por outros autores como Fernandes Neto (2020) e Miranda (2012) e manifesta a elevada rigidez destes elementos, bem como um modo de ruptura brusco por conta da baixa deformabilidade dos materiais constituintes.

Na Tabela 4.7 são apontados os valores médios e característicos para a resistência à compressão e módulo de elasticidade estático dos prismas. Por conta da alta resistência da argamassa comentada anteriormente, observa-se que não foi possível expressar uma relação direta e consistente entre ambos os elementos. Além disso, houve casos em que os prismas de 3 blocos foram mais resistentes em relação aos prismas de 2 blocos e também casos em que elementos produzidos com blocos e argamassa de menor resistência obtiveram melhor desempenho do que aqueles construídos com materiais mais resistentes. Por outro lado,

quanto ao módulo de elasticidade, observou-se uma redução nesta propriedade nos prismas de 3 blocos, tendo em vista a maior deformabilidade por conta da quantidade de juntas.

Tabela 4.7 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos prismas cerâmicos

	Prismas de 2 blocos		Prismas de 3 blocos	
	Resistência na $A_b [A_l]$ (MPa)	Módulo de elasticidade $E_{s,p}$ na $A_b [A_l]$ (GPa)	Resistência na $A_b [A_l]$ (MPa)	Módulo de elasticidade $E_{s,p}$ na $A_b [A_l]$ (GPa)
Série I				
Média	8,54 [17,74]	6,57 [13,64]	9,78 [20,31]	4,50 [9,35]
CV (%)	16,54	30,57	16,82	13,24
f_{pk}	6,13	-	7,77	-
Série II				
Média	9,97 [20,05]	5,44 [10,94]	10,95 [22,00]	4,13 [8,30]
CV (%)	20,81	26,78	16,26	12,52
f_{pk}	6,97	-	7,51	-
Série III				
Média	9,12 [18,80]	5,95 [12,28]	9,45 [19,48]	4,96 [10,22]
CV (%)	11,19	12,09	12,94	15,53
f_{pk}	7,52	-	6,72	-

* Os valores entre colchetes representam os resultados para propriedades calculadas na área líquida (A_l).

Fonte: Autoria própria.

Apesar da diferença entre os resultados médios apresentados anteriormente, os testes estatísticos F e T não indicaram nenhuma diferença significativa em todos os casos analisados. Ou seja, estatisticamente não houve diferenças entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade entre as três séries dos prismas de uma mesma geometria, conforme a Tabela 4.8. Quando comparadas entre si, as mesmas séries também não apresentaram diferenças significativas entre os resultados para os prismas de 2 e 3 blocos.

Tabela 4.8 – Teste de hipóteses estatístico para as propriedades mecânicas dos prismas de 2 blocos e [3 blocos]

Propriedade	Comparação		T_{value}	T_{crit}	$p-value$	Significância
f_p	Série I	Série II	1,108 [0,839]	2,634	0,294 [0,421]	Não
	Série I	Série III	0,720 [0,477]	2,634	0,488 [0,644]	Não
	Série II	Série III	0,653 [1,412]	2,634	0,529 [0,192]	Não
$E_{s,p}$	Série I	Série II	1,291 [1,592]	2,634	0,226 [0,143]	Não
	Série I	Série III	2,068 [1,067]	2,634	0,082 [0,313]	Não
	Série II	Série III	0,795 [2,487]	2,634	0,445 [0,056]	Não

* Os valores entre colchetes representam os resultados da análise estatística dos prismas de 3 blocos.

Fonte: Autoria própria.

O modo de ruptura dos prismas foi governado principalmente pelo surgimento de

fissuras verticais ao longo das faces laterais e longitudinais dos elementos. Além disso, também foi possível observar o fendilhamento dos blocos na região da interface bloco-junta, bem como nas proximidades das placas de apoio, como pode ser visto na Figura 4.9. Este modo de ruptura, considerado brusco e repentino, deve-se ao fato das elevadas concentrações de tensão nas paredes externas dos blocos por conta da baixa deformabilidade das juntas de argamassa, uma vez que a mesma apresentou elevada resistência em relação aos blocos.

Figura 4.9 – Modo de ruptura dos prismas



Fonte: Autoria própria.

Para altas relações entre a resistência da argamassa e a resistência do bloco (f_a/f_b), Mohamad *et al.* (2017) também comenta que esta ruptura brusca e o comportamento linear da curva tensão x deformação visto anteriormente pode ser explicado pelo fato de que o elemento se comporta quase que como uma entidade única e homogênea, tendo em vista as resistências similares de ambos os materiais. A partir deste ponto, acrescenta-se que todas as relações e considerações a respeito das propriedades mecânicas dos prismas serão realizadas tomando como base a área líquida da seção transversal destes elementos.

4.1.5 Avaliação ultrassônica

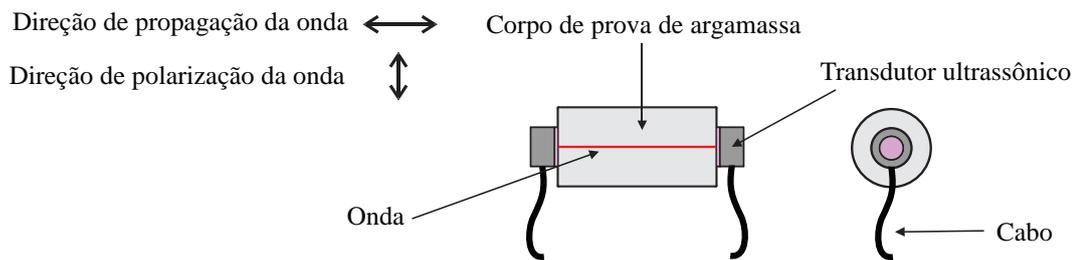
Os mesmos corpos de prova de argamassa e prismas de alvenaria detalhados nos itens 4.1.1 e 4.1.2, respectivamente, que por sua vez foram avaliados mediante a caracterização física e mecânica, também foram utilizados para a realização de ensaios não destrutivos ultrassônicos visando a avaliação da velocidade de pulso em cada um destes materiais e identificação dos fatores que podem influenciar nas propriedades dinâmicas dos mesmos.

Dessa forma, de maneira similar ao que foi descrito no capítulo 3 para os blocos cerâmicos, o ensaio consistiu na medição de pulsos ultrassônicos em corpos de prova de argamassa e prismas de alvenaria estrutural mediante medidas diretas em que se avaliou a propagação de ondas longitudinais e transversais (ondas de cisalhamento) com a utilização de transdutores específicos para ondas de cisalhamento com frequência nominal de 250 kHz, que

possibilitava a obtenção simultânea de ambas as ondas. Os demais materiais e equipamentos utilizados são similares àqueles já descritos para os blocos no item 3.1.4.

Para realização dos ensaios nos corpos de prova de argamassa os dois transdutores ultrassônicos foram posicionados em faces opostas, possibilitando a propagação das ondas ao longo do comprimento dos corpos de prova. Além disso, o posicionamento dos cabos de maneira paralela ao plano da seção transversal possibilitou a aquisição das ondas transversais polarizadas na direção radial da seção, como indicado na Figura 4.10.

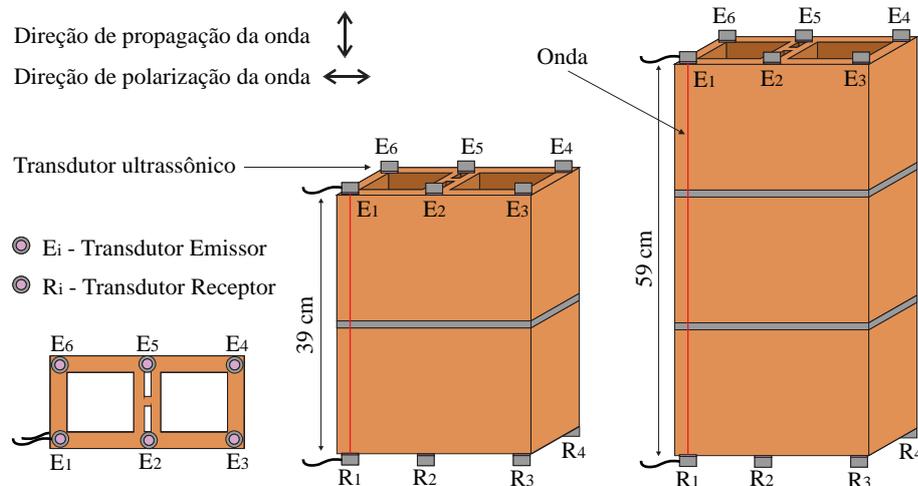
Figura 4.10 – Metodologia de ensaio ultrassônico em corpos de prova de argamassa



Fonte: Autoria própria.

Para a realização dos ensaios utilizando as medidas diretas nos prismas de alvenaria, seis pontos foram tomados sobre a seção transversal dos mesmos, observando a junção entre as paredes externas e os seus pontos médios. Tais pontos de medição podem ser observados com maiores detalhes através da Figura 4.11, onde se observa através do posicionamento dos transdutores emissores de sinal (E_i) e dos seus respectivos transdutores receptores do mesmo sinal (R_i), que necessariamente a propagação das ondas longitudinais e transversais percorreria ambos os materiais, o bloco cerâmico e a junta de argamassa.

Figura 4.11 – Metodologia de ensaio ultrassônico em prismas de alvenaria estrutural



Fonte: Autoria própria.

Acrescenta-se ainda que o espaçamento entre os transdutores emissor e receptor no caso das medidas diretas foi a própria altura dos prismas de alvenaria, ou seja, 39 cm para os

prismas de 2 blocos e 59 cm para os prismas de 3 blocos. No que diz respeito à propagação das ondas, observa-se através do posicionamento dos transdutores indicado na Figura 4.11 que a propagação das ondas ocorreu, naturalmente, ao longo da altura do elemento estrutural, ao passo que a polarização destas ocorreu na direção do comprimento dos blocos.

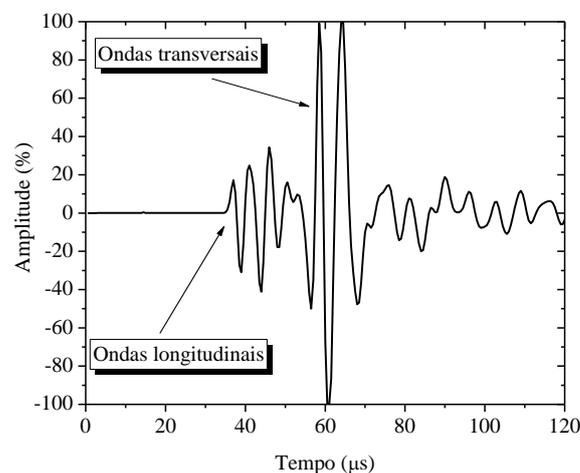
Tanto para os corpos de prova de argamassa como para os prismas de alvenaria foram emitidos 10 pulsos ultrassônicos para cada uma das medições realizadas e as velocidades de pulso ultrassônico para cada corpo de prova (no caso das argamassas) e para cada uma das medidas E_i/R_i (no caso dos prismas) referem-se à média destes 10 pulsos.

Finalmente, uma vez que a avaliação ultrassônica nos blocos cerâmicos apresentou uma baixa variação nos resultados, cabe ainda mencionar que os blocos empregados na construção dos prismas não foram avaliados mediante ensaios ultrassônicos, dado que a avaliação nos prismas foi realizada com os elementos livres de tensão, ou seja, favorecendo a manutenção das propriedades obtidas nas unidades isoladas.

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização dos ensaios ultrassônicos nos corpos de prova de argamassa, pôde-se identificar claramente a presença das ondas longitudinais e transversais, como pode ser visto no sinal típico de uma onda apresentado na Figura 4.12. Conforme comentado anteriormente, observa-se que as ondas longitudinais apresentam uma maior velocidade ultrassônica, uma vez que as partículas do meio vibram na mesma direção de propagação das ondas, enquanto as ondas transversais apresentam uma menor velocidade e maior amplitude em decorrência do processo de oscilação das partículas, transversal à direção de propagação da onda.

Figura 4.12 – Sinal ultrassônico típico em argamassa de assentamento



Fonte: Autoria própria.

A partir da obtenção dos sinais ultrassônicos, o tempo de chegada das ondas longitudinais foi fornecido pelo próprio aparelho de ultrassom e o tempo de chegada das ondas transversais foi avaliado mediante ferramenta computacional desenvolvida por Schiavon (2015). Com o tempo de propagação de ambas as ondas, a velocidade de pulso ultrassônico foi obtida através da relação entre o comprimento do corpo de prova e o tempo de propagação de cada uma das ondas. Mediante a expressão que relaciona as velocidades de propagação longitudinal ($V_{L,a}$) e transversal ($V_{T,a}$) expressa na Equação 2.15, calculou-se o coeficiente de Poisson dinâmico (ν_a) para cada um dos corpos de prova e, considerando o material como sendo homogêneo, contínuo e isotrópico, os módulos de elasticidade dinâmico longitudinal ($E_{d,a}$) e transversal ($G_{d,a}$) foram obtidos por meio das Equações 2.13 e 2.14. Para as argamassas de assentamento, a consideração de isotropia e homogeneidade é razoável e também já foi adotada por diversos outros pesquisadores, como Oliveira *et al.* (2015), Farinha *et al.* (2019) e Ramesh *et al.* (2019). A Tabela 4.9 apresenta os valores médios das propriedades dinâmicas obtidas para as argamassas de assentamento, que representam a média entre as propriedades obtidas para os seis corpos de prova de cada uma das séries.

Tabela 4.9 – Propriedades dinâmicas das argamassas de assentamento

	$V_{L,a}$ (m/s)	$V_{T,a}$ (m/s)	ν_a	$E_{d,a}$ (GPa)	$G_{d,a}$ (GPa)
Série I					
Média	3127,65	1797,60	0,253	18,41	7,35
CV (%)	0,82	0,92	5,11	1,88	2,84
Série II					
Média	3304,07	1874,07	0,263	21,05	8,34
CV (%)	1,21	1,71	4,46	2,75	3,42
Série III					
Média	3344,50	1860,03	0,276	19,95	7,82
CV (%)	1,10	0,62	3,30	1,56	1,76

Fonte: Autoria própria.

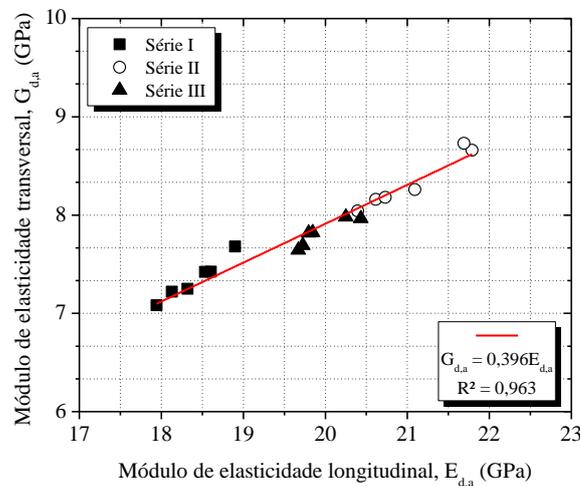
De forma geral, ambas as velocidades ultrassônicas foram maiores para argamassas mais resistentes, entretanto, por conta de uma maior densidade específica das argamassas da série II, estas apresentaram módulos de elasticidade dinâmicos levemente superiores às argamassas da série III. Observa-se também os baixos coeficientes de variação obtidos através da avaliação ultrassônica, quando comparados com aqueles obtidos dos ensaios mecânicos, corroborando com uma das principais vantagens preconizadas para este tipo de ensaios não destrutivo. Tal fato culminou na obtenção de diferenças estatisticamente significativas entre as amostras avaliadas através dos Testes F e T, exceto entre os valores médios do coeficiente

de Poisson, que apresentaram coeficientes de variação mais elevados, e para amostras de velocidades longitudinais e transversais das séries II e III que apresentaram divergências muito pequenas.

Ao comparar o módulo de elasticidade dinâmico apresentado na Tabela 4.9 com o módulo de elasticidade estático obtido dos ensaios mecânicos apresentado na Tabela 4.6, o módulo de elasticidade dinâmico mostrou-se em média 63,62% superior ao módulo estático, com coeficiente de variação de aproximadamente 23%. Esta tendência pode ser explicada pelo fato de que o módulo de elasticidade dinâmico corresponde a uma mobilização muito pequena das deformações no corpo de prova, quando o nível de danificação do material é praticamente nulo, conforme comentado previamente. No que diz respeito à relação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático, Mehta e Monteiro (2008) comentam que o módulo dinâmico pode ser aproximadamente 20%, 30% e 40% superior ao estático para concretos de alta, média e baixa resistência. No entanto, em estudo experimental realizado por Santos *et al.* (2013) essa superioridade variou entre 56,6% e 61,5% para concretos de baixa resistência, enquanto em argamassas de cal e cimento com resistência à compressão de até 9,60 MPa analisadas por Haach (2017) essa variação foi de aproximadamente 57,4%. Portanto, mediante variabilidade entre a relação de ambas as propriedades, considera-se coerente a relação obtida neste trabalho, apesar do número reduzido de corpos de prova.

Uma boa correlação entre os módulos de elasticidade dinâmicos longitudinal e transversal foi apresentada na Figura 4.13. De acordo com os resultados obtidos da avaliação ultrassônica, o módulo de elasticidade dinâmico transversal corresponde a aproximadamente 39,6% do módulo de elasticidade dinâmico longitudinal.

Figura 4.13 – Relação entre os módulos de elasticidade longitudinal e transversal das argamassas de assentamento



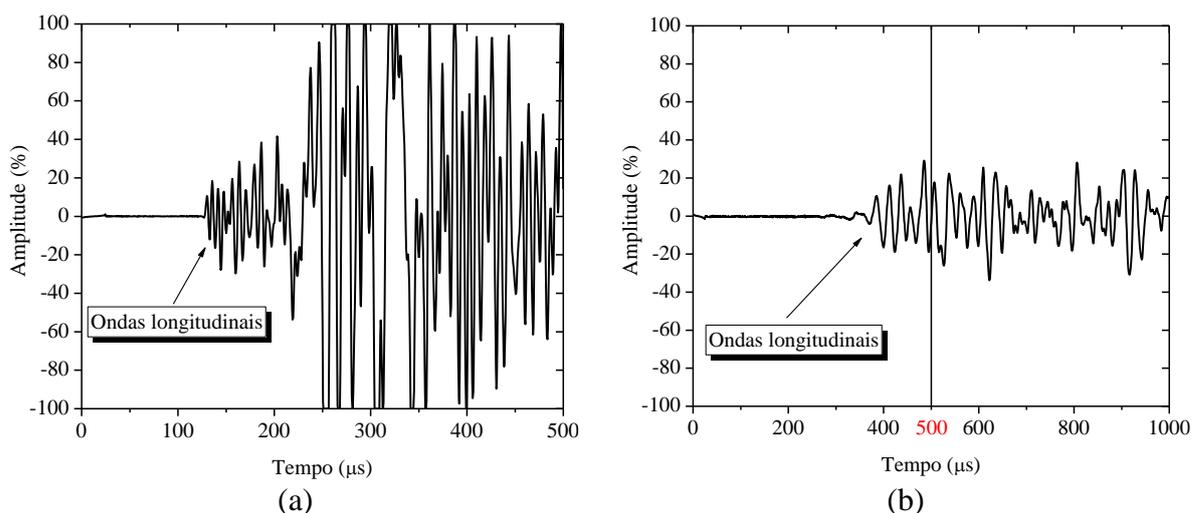
Fonte: Autoria própria.

A partir da relação entre ambos os módulos dinâmicos e utilizando a expressão oriunda da resistência dos materiais clássica indicada na Equação 2.16, o coeficiente de Poisson dinâmico médio para todas as séries de argamassa foi de aproximadamente 0,263. Pelo fato de tratar-se de uma propriedade dinâmica, também há uma tendência de que este valor seja levemente superior aos valores de coeficiente de Poisson usualmente obtidos através de ensaios estáticos. Quanto à estes ensaios, tomando como base os testes realizados por Anson e Newman (1966), que obtiveram coeficientes de Poisson variando entre 0,17 e 0,23 para argamassas com resistência à compressão entre 9,1 e 14 MPa, e os estudos realizados por Lübeck (2016) que observou um coeficiente médio igual a 0,22 em argamassas com 13,5 MPa de resistência à compressão, nota-se a abrangência de resultados estáticos ligeiramente inferiores àqueles dinâmicos obtidos neste trabalho.

4.2.1 Variação da VPU em prismas de alvenaria

A partir dos ensaios ultrassônicos nos prismas de alvenaria foi possível realizar a obtenção dos perfis de onda representados através dos sinais típicos da Figura 4.14. De maneira geral, duas observações são nítidas nestes perfis de onda dos prismas de 2 e 3 blocos, a grande diferença no tempo de propagação e na amplitude das ondas entre as duas geometrias de prismas.

Figura 4.14 – Sinal ultrassônico típico em prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos



Fonte: Autoria própria.

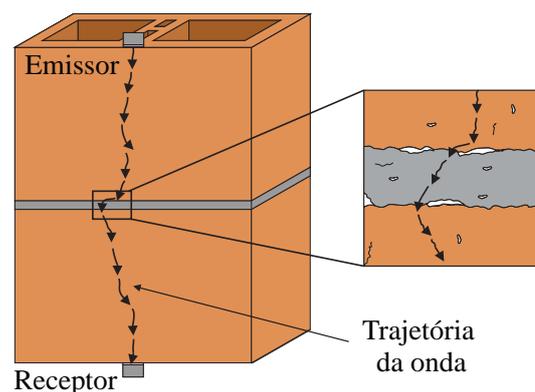
No primeiro caso, a diferença no tempo de propagação das ondas já era prevista pelo fato natural de que o trajeto percorrido por elas nos prismas de 3 blocos é cerca de 51% superior ao trajeto percorrido pelas mesmas ondas nos prismas de 2 blocos, uma vez que as medidas diretas nos prismas de 3 blocos foram realizadas ao longo de 59 cm, enquanto nos

demais o percurso era de apenas 39 cm. Entretanto, nota-se nos sinais ultrassônicos típicos que a diferença entre os dois tempos de propagação é superior a diferença entre os dois trajetos percorridos. Esta divergência corrobora com o segundo caso comentado anteriormente que é a diferença na amplitude das ondas.

Para este segundo caso, considerando o atraso nas ondas longitudinais dos prismas de 3 blocos, a escala de tempo do sinal típico foi dobrada para permitir a visualização de que em nenhum instante de tempo posterior a 500 μ s houve um aumento considerável na amplitude destas ondas. Ou seja, a redução de amplitude das ondas nos prismas de 3 blocos é significativa em relação aos prismas de 2 blocos e demonstra claramente a perda de energia do sinal ultrassônico nestes elementos. Além desta perda de energia e consequente redução da amplitude das ondas, observou-se também um atraso no tempo de propagação das ondas nos prismas de 3 blocos, que por sua vez não está ligado apenas ao efeito do maior trajeto percorrido, como comentado previamente.

Quanto à perda de energia das ondas ultrassônicas em elementos de alvenaria, McCann e Forde (2001) atribuem este fato à atenuação das ondas na região da interface entre os blocos e a junta de argamassa. Segundo os mesmos autores, essa atenuação ocorre principalmente pela presença de fissuras e vazios na junta ou pela própria delaminação na interface entre a junta e o bloco, o que ocasiona um incremento no tempo de propagação da onda, tendo em vista que esta deve percorrer um trajeto maior para desviar destas falhas e conseguir se propagar até o transdutor receptor do sinal, como mostra a Figura 4.15.

Figura 4.15 – Propagação de onda ultrassônica em interface bloco-junta



Fonte: Autoria própria.

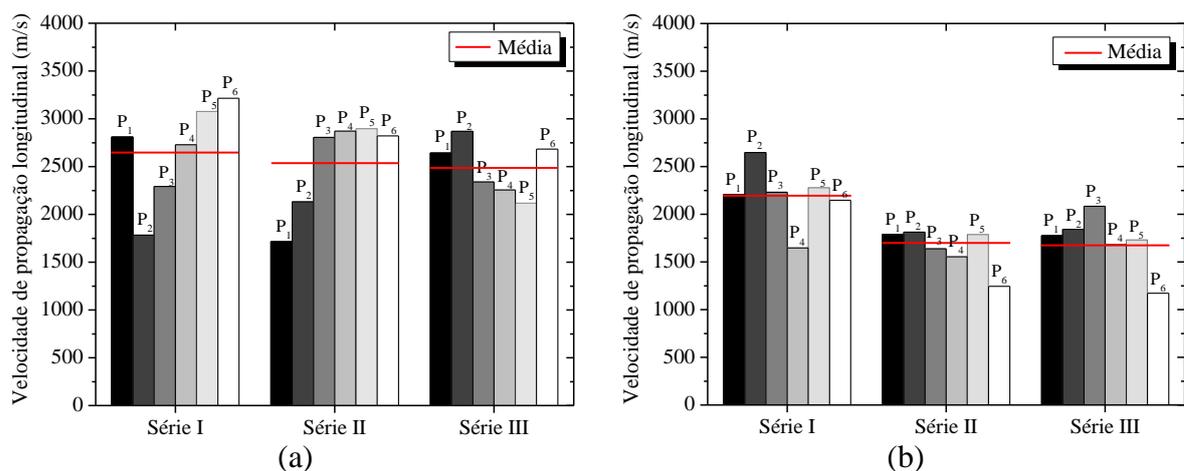
De acordo com Malhotra e Carino (2014), além da atenuação provocada pela presença de falhas e alteração do trajeto da onda, quando a onda atinge a interface ocorrem reflexões e refrações que interferem na energia total da onda e que dependem do ângulo de incidência e da impedância dos diferentes meios. Além disso, Aggelis *et al.* (2009) comenta ainda que a presença de rugosidades superficiais na região de contato entre os diferentes materiais (Figura

4.15) favorece o fenômeno de dispersão das ondas e também contribui para a atenuação do sinal ultrassônico.

De posse do esclarecimento a respeito da atenuação das ondas ultrassônicas na região da interface bloco-junta, acrescenta-se ainda que tal efeito também prejudicou a propagação das ondas transversais, uma vez que para a grande maioria dos prismas avaliados não foi possível identificar com precisão o instante de chegada das ondas transversais, como pode ser observado na Figura 4.14. Como discutido anteriormente, estas apresentam um menor comprimento de onda e, portanto, são mais sensíveis as variações no meio de propagação. Por este motivo, serão discutidos aqui apenas os resultados referentes às ondas longitudinais.

Neste sentido, a Figura 4.16 apresenta a velocidade de propagação ultrassônica longitudinal para cada um dos 36 prismas avaliados (seis de cada série por geometria). A velocidade de cada um dos prismas foi obtida através da média entre os seis pontos de medidas diretas, conforme indicado anteriormente na Figura 4.11.

Figura 4.16 – Velocidade de pulso ultrassônico em prismas (a) de 2 blocos e (b) 3 blocos

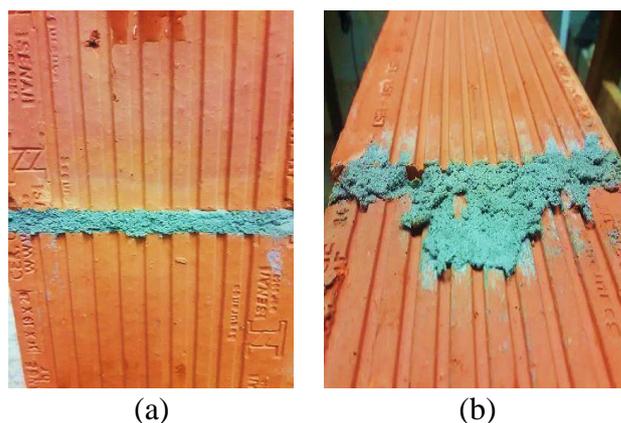


Fonte: Autoria própria.

Diferentemente daquilo que foi observado para os blocos cerâmicos e corpos de prova de argamassa, que apresentaram coeficientes de variação da velocidade de pulso ultrassônico fluando de 2% a 5% nos blocos e de 0,8% a 1,2% nas argamassas, os prismas de alvenaria exibiram coeficientes que variaram de 11% a 20% nos prismas de 2 blocos e de 6% a 17% nos prismas de 3 blocos. Uma vez que os materiais constituintes destes elementos não indicaram variações significativas em sua respectiva velocidade de pulso ultrassônico, estas variações se sobrepõem inclusive àquelas usualmente observadas nos ensaios não destrutivos ultrassônicos e podem ser atribuídas à grande variabilidade ocasionada pela interface bloco-junta nos diferentes elementos. Tal variabilidade usualmente pode ocorrer devido à diversos fatores ligados à própria construção dos prismas, às condições dos materiais utilizados quanto

à rugosidade superficial na região de ligação entre o bloco e a junta, às propriedades dos materiais constituintes como a retração da argamassa de assentamento durante o seu processo de endurecimento e às condições ambientais de cura, como temperatura e umidade. A Figura 4.17 apresenta uma situação do assentamento dos prismas que pode afetar a propagação das ondas ultrassônicas na interface bloco-junta, bem como aumentar a variabilidade dos resultados obtidos em outras regiões do mesmo elemento estrutural.

Figura 4.17 – Junta de assentamento em (a) boas e (b) más condições de interface



Fonte: Autoria própria.

Em razão destas variações, os testes estatísticos F e T não apontaram nenhuma diferença estatisticamente significativa entre as três séries de prismas de 2 blocos comparadas entre si, enquanto que nos prismas de 3 blocos apenas comparações entre as séries I e II e séries I e III apontaram diferenças para o nível de significância considerado (5%), conforme descrito na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Teste de hipóteses estatístico para a velocidade de pulso ultrassônico dos prismas de 2 e 3 blocos

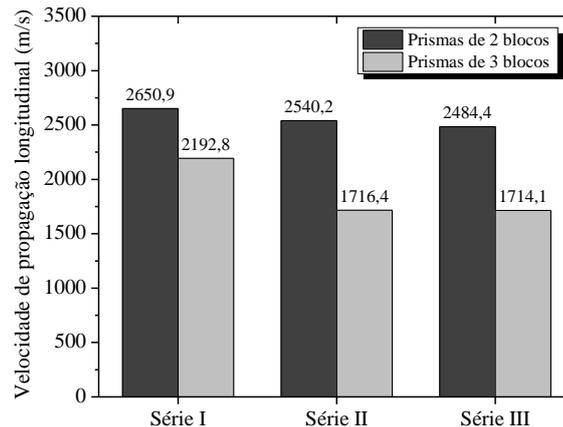
Elemento	Comparação		T_{value}	T_{crit}	$p-value$	Significância
Prismas de 2 blocos	Série I	Série II	0,372	2,634	0,717	Não
	Série I	Série III	0,673	2,634	0,516	Não
	Série II	Série III	0,238	2,634	0,817	Não
Prismas de 3 blocos	Série I	Série II	3,380	2,685	0,013	Sim
	Série I	Série III	2,664	2,634	0,024	Sim
	Série II	Série III	0,017	2,685	0,987	Não

Fonte: Autoria própria.

A partir da velocidade ultrassônica longitudinal de cada um dos prismas apresentada na Figura 4.16, realizou-se a média entre as velocidades dos seis prismas de cada série para definir a velocidade média por série de prismas. Tais resultados estão expostos na Figura 4.18 e para todos as séries analisadas apresentaram velocidades inferiores em relação àquelas

obtidas pelos blocos e pelas argamassas. Além disso, observou-se uma clara tendência de redução na velocidade ultrassônica dos prismas de 3 blocos em relação aos prismas de 2 blocos, o que corrobora com os resultados obtidos por Schuller *et al.* (1997) e Miranda *et al.* (2013) que também observaram uma redução nesta propriedade conforme aumento do número de juntas de argamassa no elemento analisado.

Figura 4.18 – Variação da velocidade ultrassônica longitudinal em prismas de alvenaria



Fonte: Autoria própria.

No caso dos ensaios realizados por Schuller *et al.* (1997), os autores observaram esta redução em ensaios realizados através de medidas diretas e indiretas e constataram uma estabilização nos valores de velocidade ultrassônica para elementos com três ou mais juntas, fato que também foi notado por Miranda *et al.* (2013). Esta tendência de redução da velocidade em elementos maiores vai ao encontro da influência da atenuação das ondas ultrassônicas na região da interface bloco-junta, de forma que elementos com uma maior quantidade de juntas apresentam consequentemente uma maior possibilidade de atenuação

Embora esta constatação tenha sido observada para todos os casos analisados, os testes estatísticos Fe T não apontaram diferenças significativas durante a comparação realizada entre ambas as séries I dos prismas de 2 e 3 blocos, como mostra a Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Teste de hipóteses estatístico referente à comparação entre a velocidade de pulso ultrassônico dos prismas de 2 e 3 blocos

Elemento	Comparação		T_{value}	T_{crit}	$p-value$	Significância
Série I	Prismas de 2 blocos	Prismas de 3 blocos	1,804	2,634	0,108	Não
Série II			3,943	2,634	0,006	Sim
Série III			4,518	2,685	0,001	Sim

Fonte: Autoria própria.

Mediante o que foi discutido anteriormente neste mesmo item, a Tabela 4.12 apresenta um resumo das médias da velocidade de pulso ultrassônico longitudinal dos prismas ($V_{L,p}$) e os seus respectivos coeficientes de variação.

Tabela 4.12 – Velocidade de pulso ultrassônico longitudinal em prismas de alvenaria

	Série I	Série II	Série III
Prismas de 2 blocos			
$V_{L,p}$ (m/s)	2650,89	2540,24	2484,37
CV (%)	20,08	19,53	11,67
Prismas de 3 blocos			
$V_{L,p}$ (m/s)	2192,76	1716,41	1714,09
CV (%)	14,67	6,65	17,53

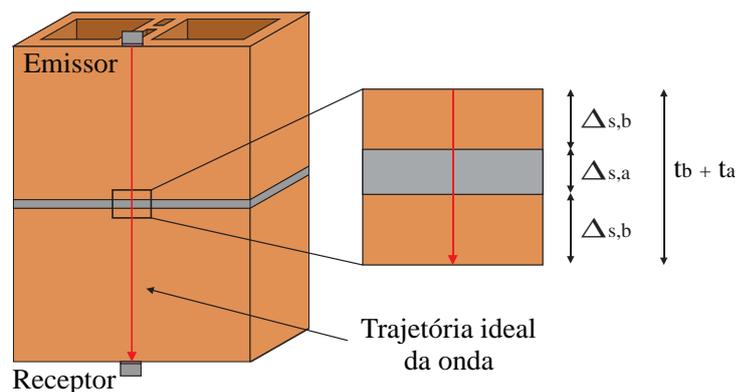
Fonte: Autoria própria.

Neste ponto, cabe ainda ratificar que os prismas de alvenaria estrutural são elementos compósitos que possuem distintas propriedades em suas diferentes direções. Além disso, a realização de medidas diretas ao longo da altura do elemento percorre uma seção transversal que é notadamente heterogênea, tendo em vista a presença de dois materiais diferentes. Dessa forma, estas observações inviabilizam a aplicação direta nos prismas das equações desenvolvidas para materiais isotrópicos e homogêneos que foram utilizadas anteriormente para obtenção das propriedades dinâmicas das argamassas de assentamento.

4.2.2 Redução da VPU na interface bloco-junta

Mediante a análise da velocidade ultrassônica nos prismas de alvenaria, observou-se uma influência considerável da atenuação das ondas na interface bloco-junta nos resultados obtidos. Para avaliar melhor a influência deste efeito, considerou-se um elemento típico de alvenaria estrutural (Figura 4.19) que indica a propagação ideal de uma onda ultrassônica através do elemento, ou seja, considerando a interface perfeita entre ambos os materiais, bem como a inexistência de fissuras, vazios e rugosidade superficial na ligação para desprezar os efeitos da reflexão, refração e dispersão da onda que contribuem no fenômeno da atenuação

Figura 4.19 – Propagação ideal de onda ultrassônica em prisma de alvenaria



Fonte: Autoria própria.

Do ponto de vista teórico, levando-se em consideração que a propagação ocorre através de ambos os materiais, sabe-se que o tempo de propagação de uma onda ultrassônica em um prisma de alvenaria (t_p) é dado pela soma entre o tempo necessário para percorrer os blocos (t_b) e o tempo necessário para cruzar as juntas de argamassa (t_a), conforme apresentado pela Equação 4.1.

$$t_p = t_b + t_a \quad \text{Equação 4.1}$$

O tempo de propagação de uma onda ultrassônica pode ser dado pela relação entre a velocidade de propagação da onda e distância percorrida pela mesma. Dessa forma, empregando esta relação na Equação 4.1 é possível obter uma expressão que relaciona a velocidade teórica nos prismas a partir das velocidades dos seus materiais constituintes e da distância percorrida pelas ondas em cada um destes materiais, a partir da Equação 4.2.

$$\frac{V_{L,p\text{-teo}}}{\Delta_{s,b} + \Delta_{s,a}} = \frac{V_{Lb,A}}{\Delta_{s,b}} + \frac{V_{L,a}}{\Delta_{s,a}} \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

$V_{L,p\text{-teo}}$ é a velocidade ultrassônica longitudinal teórica nos prismas;

$V_{Lb,A}$ é a velocidade ultrassônica longitudinal ao longo da altura dos blocos cerâmicos;

$V_{L,a}$ é a velocidade ultrassônica longitudinal na argamassa de assentamento;

$\Delta_{s,b}$ é a distância percorrida pelas ondas nos blocos;

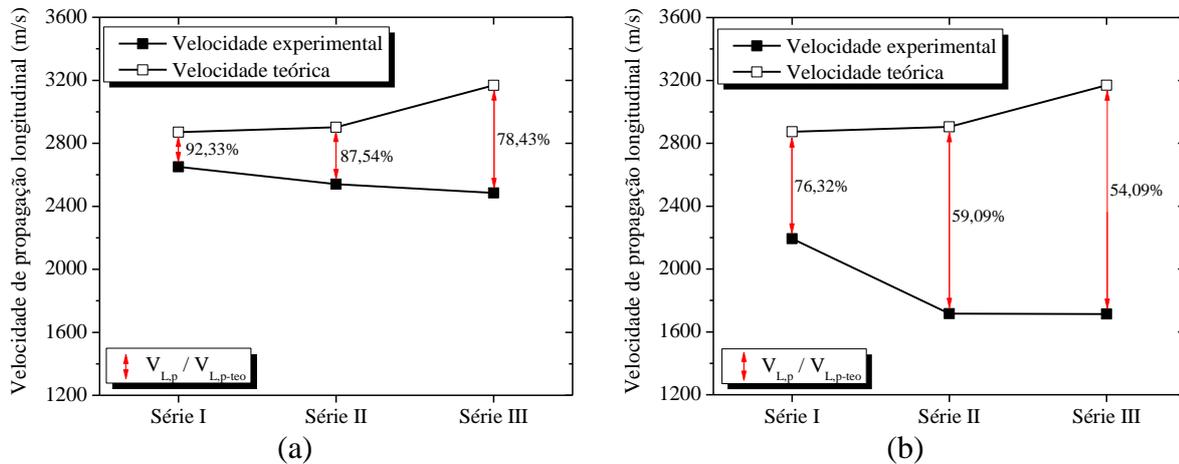
$\Delta_{s,a}$ é a distância percorrida pelas ondas nas juntas de argamassa.

Rearranjando a Equação 4.2, a velocidade ultrassônica longitudinal teórica em um prisma de alvenaria estrutural pode ser dada por:

$$V_{L,p\text{-teo}} = \frac{V_{Lb,A} V_{L,a} (\Delta_{s,b} + \Delta_{s,a})}{\Delta_{s,b} V_{L,a} + \Delta_{s,a} V_{Lb,A}} \quad \text{Equação 4.3}$$

Dessa forma, substituindo os resultados obtidos de forma isolada para a velocidade de propagação longitudinal nos blocos cerâmicos na direção da altura e nos corpos de prova de argamassa e, considerando as respectivas distâncias percorridas pela onda em cada um destes materiais quando posicionados em conjunto formando o prisma de alvenaria, a velocidade de propagação longitudinal teórica dos prismas foi apresentada na Figura 4.20. Como as velocidades obtidas para os materiais isolados (bloco e argamassa) apresentaram valores mais elevados para as séries de maior resistência mecânica, observa-se que a velocidade teórica dos prismas segue esta mesma tendência crescente para as séries I, II e III, respectivamente, mantendo-se basicamente sem alterações significativas entre as duas geometrias de prismas.

Figura 4.20 – Comparação entra a velocidade teórica e experimental para prismas (a) de 2 blocos e (b) de 3 blocos



Fonte: Autoria própria.

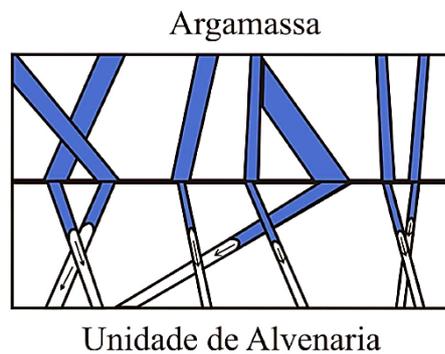
Por outro lado, é notória a redução da velocidade ultrassônica obtida experimentalmente nos prismas, sendo mais considerável nos prismas de 3 blocos, conforme comentado anteriormente. Observa-se que para os prismas de 2 blocos, a velocidade real nos prismas da série I foi de aproximadamente 92,33% da velocidade teórica e nos prismas das séries II e III, alcançou valores de apenas 87,54% e 78,43% da mesma, respectivamente. Neste mesmo sentido, os prismas de 3 blocos apresentaram reduções mais significativas, uma vez que a velocidade medida experimentalmente foi de apenas 76,32% da teórica para a série I e reduziu para pouco mais da metade nas séries II e III, respectivamente. Como a velocidade teórica foi obtida desconsiderando os efeitos da atenuação das ondas na interface bloco-junta, esta redução das velocidades observada experimentalmente procura esclarecer e isolar a influência da atenuação destas ondas na velocidade de pulso ultrassônico dos prismas de alvenaria.

Simultaneamente à redução da velocidade experimental em relação à teórica observou-se que, embora os testes estatísticos relatados na Tabela 4.10 não tenham apresentado diferenças significativas na comparação entre a velocidade ultrassônica dos prismas de diferentes séries para a grande maioria dos casos, observou-se que houve uma tendência para ambas as geometrias de prismas de que esta redução na velocidade dos prismas por conta da atenuação na interface bloco-junta seja maior em elementos cujos materiais constituintes possuam maior resistência mecânica, uma vez que as reduções nas séries III, II e I seguiram essa tendência decrescente.

Acredita-se que este efeito esteja relacionado ao mecanismo de ligação entre a argamassa de assentamento presente na junta e o substrato poroso do bloco de alvenaria. Uma

das hipóteses é justamente a menor porosidade dos blocos cerâmicos de maior resistência, como observado na Tabela 3.4. A partir de uma série de ensaios experimentais para avaliar o transporte de água e a aderência entre argamassas de assentamento e blocos de alvenaria, Casali (2008) esclarece que durante o processo de endurecimento da argamassa de assentamento irá ocorrer a transferência de água da argamassa no estado fresco para o substrato de alvenaria. Entretanto, esta água de amassamento que será transferida também contém em dissolução ou estado coloidal os componentes do próprio aglomerante, como indicado na Figura 4.21.

Figura 4.21 – Processo de transferência da água de amassamento da argamassa no estado fresco para a unidade de alvenaria



Fonte: Adaptada de Casali (2008).

De acordo com Carasek (1996), essas partículas e íons transportados na água de amassamento são dispostas no interior dos poros do substrato de alvenaria, onde ocorrem fenômenos de precipitação dos géis de silicato do cimento e/ou do hidróxido de cálcio da cal que com o tempo exercem ação de ancoragem da argamassa à base. Além disso, Gallegos (1995) comenta que a adesão entre a argamassa e o substrato de alvenaria é proveniente justamente dessa ancoragem dos cristais hidratados de cimento nos poros dos blocos. Neste sentido, uma vez que nas séries II e III os blocos cerâmicos possuem menor porosidade e absorção de água, a transferência da água de amassamento da argamassa para os blocos é menor e tais pontes de adesão entre a argamassa e a unidade podem ficar prejudicadas, o que contribui para a atenuação das ondas ultrassônicas na interface bloco-junta.

Outro fator que pode interferir e justificar este comportamento é a presença de maior teor de cal nas argamassas menos resistentes, uma vez que a cal pode promover melhorias tanto na extensão como no valor da resistência de aderência (Carasek, 2017). Em contrapartida, Bastos (2005) descreve que o aumento do teor de finos e da relação água/cimento nestas mesmas argamassas pode favorecer o fenômeno da retração durante a secagem e prejudicar a interação entre o bloco e a junta de argamassa, o que de certa forma

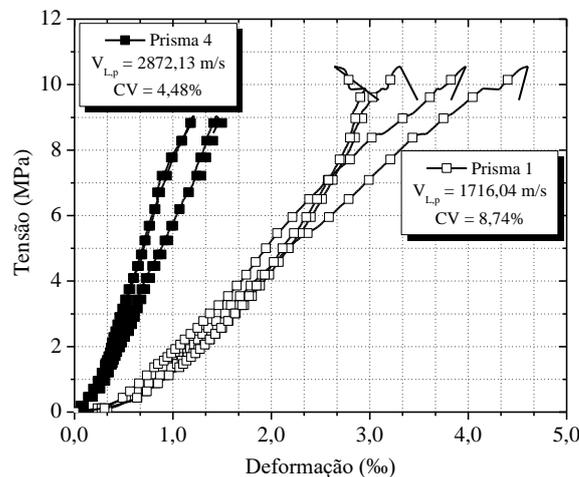
favorece o surgimento de fissuras na junta e dificulta a propagação das ondas ultrassônicas. Dessa maneira, diante da baixa quantidade de estudos dedicados à avaliação ultrassônica cuja atenuação das ondas na interface bloco-junta é um fator preponderante, mais pesquisas relacionadas aos diversos fatores que podem intervir nesta atenuação ainda são necessárias para uma melhor compreensão deste efeito.

4.2.3 Influência da deformabilidade dos prismas na VPU

Uma vez que a interface bloco-junta também possui uma grande influência nas características de deformabilidade dos prismas de alvenaria, foi possível estabelecer algumas relações entre o comportamento mecânico dos prismas de alvenaria e a sua respectiva velocidade de pulso ultrassônico.

Ao analisar o comportamento tensão x deformação dos prismas, observou-se que elementos com maior deformabilidade também apresentaram velocidades ultrassônicas mais reduzidas. A Figura 4.22 apresenta as curvas tensão x deformação de dois prismas de uma mesma série, cujas características de deformabilidade foram distintas e a respectiva velocidade de propagação ultrassônica média de cada um destes elementos.

Figura 4.22 – Relação entre as curvas tensão x deformação e a VPU de prismas de alvenaria de 2 blocos da Série II

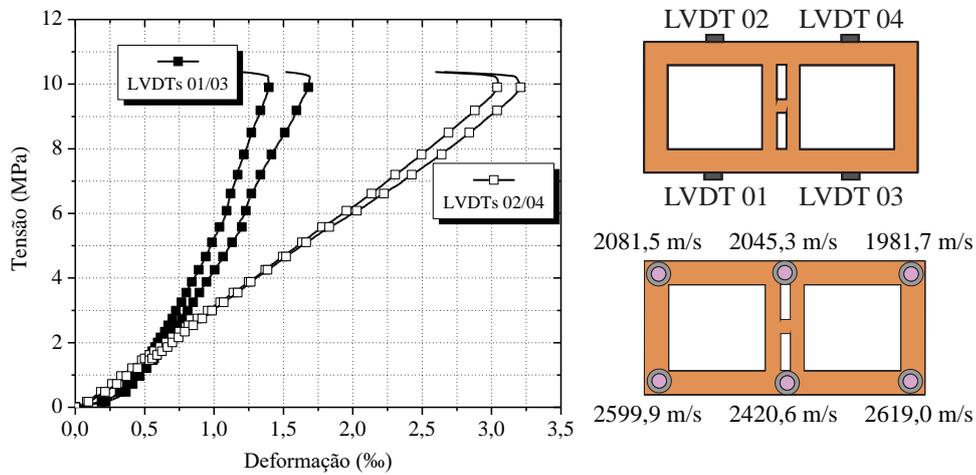


Fonte: Autoria própria.

Além da relação entre a VPU e a curva tensão x deformação global para diferentes prismas, este comportamento também pôde ser notado nas diferentes regiões de um mesmo prisma, conforme indicado na Figura 4.23. Avaliando as características de deformabilidade de um mesmo prisma, uma vez que foram utilizados quatro transdutores de deslocamento (LVDTs) para aferição dessas medidas, observa-se que as regiões que apontaram para uma

maior deformabilidade do elemento, também indicaram velocidades ultrassônicas mais reduzidas.

Figura 4.23 – Relação entre a curva tensão x deformação do prisma de alvenaria P3 de 2 blocos da Série I

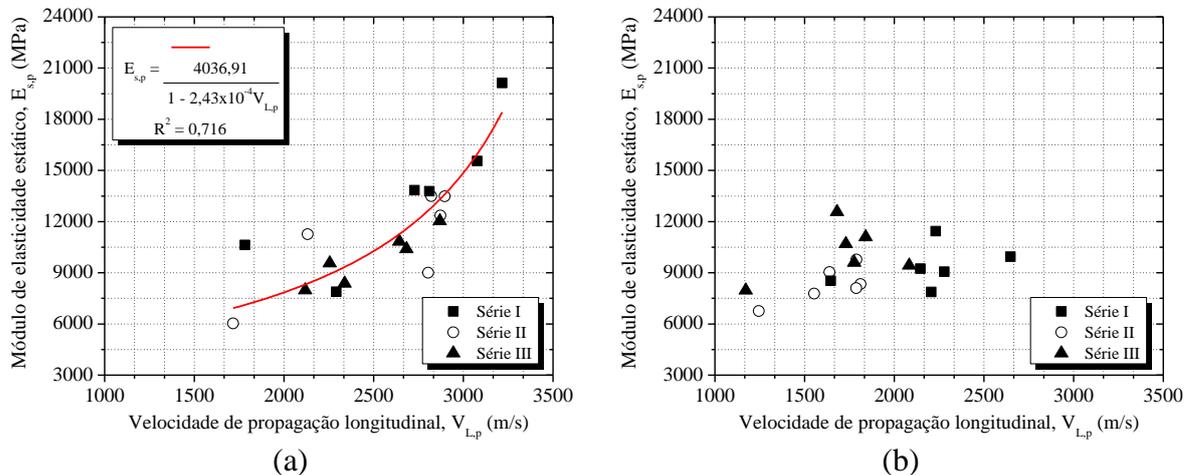


Fonte: Autoria própria.

Esta relação entre a deformabilidade de um prisma de alvenaria e a sua velocidade de propagação ultrassônica deve-se basicamente ao fato de que as mesmas falhas como fissuras, vazios e delaminações presentes na região da interface bloco-junta, que favorecem a atenuação e redução da VPU, também possibilitam uma maior acomodação das deformações dos prismas quando submetidos à carregamentos.

Uma vez que a deformabilidade dos prismas reflete diretamente em seu módulo de elasticidade estático, a Figura 4.24 apresenta a relação entre a velocidade de pulso ultrassônico e o módulo de elasticidade estático dos prismas de alvenaria. Observa-se que uma relação razoável foi verificada para os prismas de 2 blocos, indicando um acréscimo no módulo estático conforme elevação da velocidade de propagação.

Figura 4.24 – Relação entre o módulo de elasticidade estático e a velocidade de propagação ultrassônica em prismas (a) de 2 blocos e (b) 3 blocos

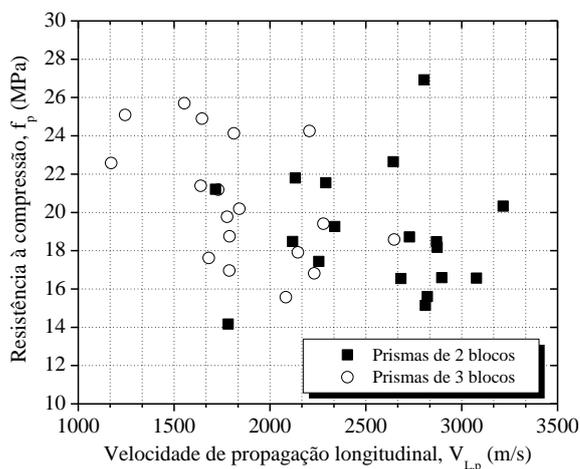


Fonte: Autoria própria.

Através da curva que define a relação, nota-se que o acréscimo no módulo foi mais substancial para medidas de VPU acima de 2500 m/s. Por outro lado, tais relações não puderam ser verificadas para os prismas de 3 blocos. Nestes elementos, esse tipo de relação é mais dificultosa pelo envolvimento de outros efeitos, como a própria perda de energia do sinal ultrassônico devido ao maior trajeto de propagação das ondas, bem como pela possibilidade de surgimento de instabilidade nos elementos durante os ensaios mecânicos, tendo em vista a sua maior altura.

Quando comparada com os resultados de resistência à compressão dos prismas, não foi observada nenhuma relação direta com a velocidade de propagação ultrassônica, independente da geometria de prisma, conforme ilustrado na Figura 4.25.

Figura 4.25 – Relação entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação ultrassônica em prismas de alvenaria



Fonte: Autoria própria.

4.3 ANÁLISE TEÓRICA

Tendo em vista a baixa relação entre a velocidade de pulso ultrassônico dos prismas e as suas propriedades mecânicas, tais como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático, principalmente no caso dos prismas de 3 blocos, um modelo teórico foi proposto para realizar a previsão das propriedades mecânicas destes elementos através das propriedades dinâmicas dos seus materiais constituintes, ou seja, do bloco e da argamassa.

4.3.1 Previsão da resistência à compressão dos prismas em função da VPU dos materiais constituintes

De acordo com a avaliação ultrassônica realizada no Capítulo 3, observou-se através da Figura 3.25 que a resistência à compressão dos blocos cerâmicos relaciona-se com a

velocidade de propagação ultrassônica média destas unidades através da relação potencial descrita na Equação 4.4.

$$f_b = 2,90 \left(\frac{V_{L,b}}{10^3} \right)^2 \quad \text{Equação 4.4}$$

Onde:

f_b é a resistência média à compressão do bloco cerâmico (em MPa);

$V_{L,b}$ é a velocidade ultrassônica longitudinal média do bloco cerâmico (em m/s).

A partir da caracterização mecânica realizada nas diferentes séries de argamassas de assentamento, notou-se que a resistência à compressão das argamassas se relaciona diretamente com o seu módulo de elasticidade estático através da Equação 4.5, por sua vez expressa graficamente através da Figura 4.26.

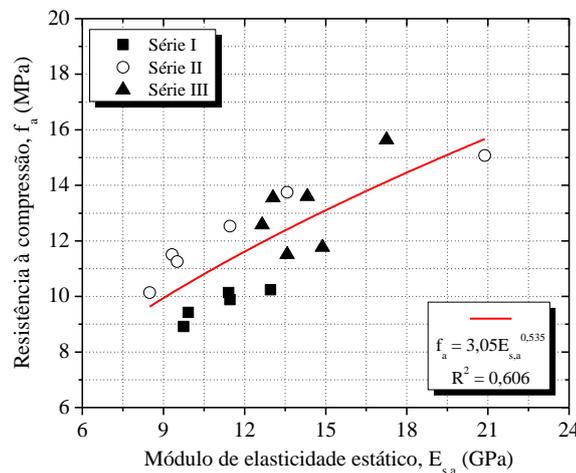
$$f_a = 3,05E_{s,a}^{0,535} \quad \text{Equação 4.5}$$

Onde:

F_a é a resistência média à compressão da argamassa de assentamento (em MPa);

$E_{s,a}$ é módulo de elasticidade estático da argamassa de assentamento (em GPa).

Figura 4.26 – Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático das argamassas



Fonte: Autoria própria.

Ao longo do tempo, diversos autores da literatura técnica propuseram relações empíricas que possibilitasse correlacionar o módulo de elasticidade estático das argamassas de assentamento com o seu respectivo módulo de elasticidade dinâmico. Haach (2017), em estudo de argamassas para alvenaria estrutural com propriedades similares as que foram empregadas neste trabalho, observou que o módulo de elasticidade estático de tais argamassas representava aproximadamente 63,5% do seu módulo de elasticidade dinâmico. Substituindo

esta relação na Equação 4.5, é possível obter uma expressão que relaciona a resistência à compressão das argamassas com o seu módulo de elasticidade dinâmico ($E_{d,a}$).

$$f_a = 2,393E_{d,a}^{0,535} \quad \text{Equação 4.6}$$

Mediante as discussões realizadas previamente, considerando as argamassas como materiais homogêneos, isotrópicos e contínuas, o seu módulo de elasticidade dinâmico pode ser dado pela Equação 4.7.

$$E_{d,a} = V_{L,a}^2 \rho_a \frac{(1-2\nu_a)(1+\nu_a)}{(1-\nu_a)} \quad \text{Equação 4.7}$$

Onde:

$V_{L,a}$ é a velocidade ultrassônica longitudinal da argamassa de assentamento (em m/s);

ρ_a é a densidade específica da argamassa de assentamento (em kg/m³);

ν_a é o coeficiente de Poisson da argamassa de assentamento.

De posse do coeficiente de Poisson médio igual a 0,263 discutido no item 4.2, substituindo a Equação 4.7 na Equação 4.6, pode-se obter a Equação 4.8 que relaciona a resistência à compressão da argamassa com a sua respectiva velocidade de pulso ultrassônico e densidade específica.

$$f_a = 2,139 \left(\frac{V_{L,a}^2 \rho_a}{10^9} \right)^{0,535} \quad \text{Equação 4.8}$$

Conforme comentado no item 2.1, a Equação 4.9 é muito utilizada por diversos autores que propõem relações empíricas que permitem obter a resistência à compressão de um elemento de alvenaria a partir das resistências de seus materiais constituintes.

$$f_p = \chi f_b^{k_1} f_a^{k_2} \quad \text{Equação 4.9}$$

Como grande parte das relações propostas foram idealizadas a partir de resultados experimentais de elementos de alvenaria construídos com tijolos cerâmicos, a partir de ajustes tomando como base os resultados experimentais obtidos neste trabalho, propõe-se os coeficientes $\chi = 0,95$, $k_1 = 0,70$ e $k_2 = 0,35$ para relacionar a resistência de um prisma cerâmico com as resistências do bloco e da argamassa.

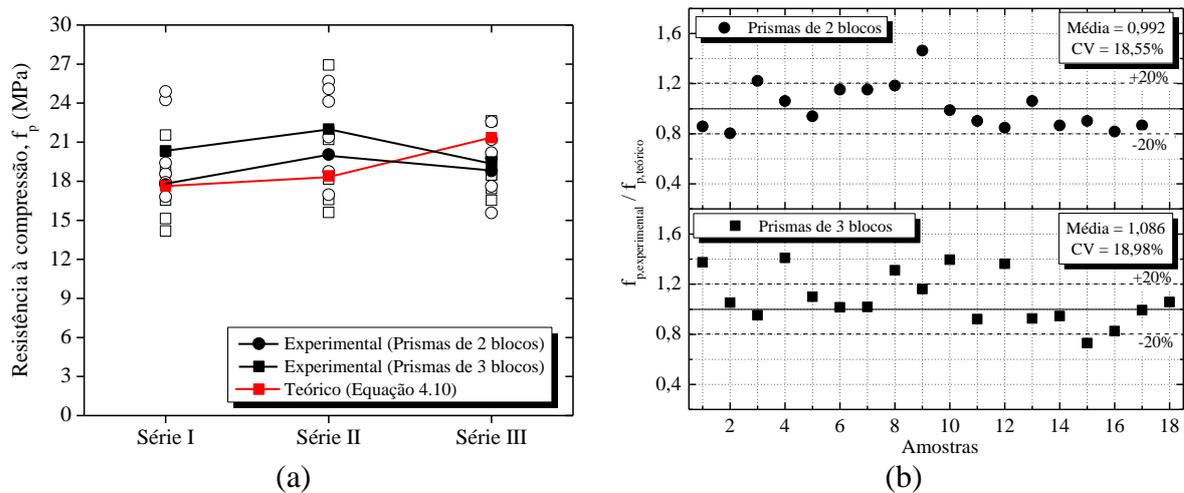
Uma vez que a resistência de um bloco cerâmico pode ser obtida através de sua velocidade de pulso ultrassônico mediante a Equação 4.4 e a resistência à compressão da argamassa de assentamento pode ser obtida através de sua velocidade de pulso ultrassônico por meio da Equação 4.8, ambas as equações podem ser inseridas na Equação 4.9 que, com o emprego dos coeficientes χ , k_1 e k_2 relaciona a resistência à compressão de um prisma de

alvenaria estrutural formado por 2 ou 3 blocos cerâmicos com as velocidades de propagação ultrassônica dos próprios blocos e da argamassa de assentamento que constituem o prisma através da Equação 4.10.

$$f_p = \frac{(V_{L,b})^{1,40} (V_{L,a}^2 \rho_a)^{0,1875}}{2,94 \times 10^5} \quad \text{Equação 4.10}$$

Uma vez que não foram realizados ensaios ultrassônicos nos blocos cerâmicos que compõem cada um dos prismas de alvenaria, os resultados médios de velocidade de pulso ultrassônico de cada uma das séries foram utilizados na Equação 4.10 para verificar a conformidade entre os resultados teóricos previstos com aqueles obtidos experimentalmente. A Figura 4.27a apresenta a previsão teórica para a resistência à compressão dos prismas comparada com todos os corpos de prova ensaiados experimentalmente. Em média, o modelo mostrou-se relativamente razoável em tal previsão e apresentou diferenças que variaram de 1,0% a 6,5% nas séries de prismas de 2 blocos e de 13% a 16% nos prismas de 3 blocos. Na Figura 4.27b é possível observar a relação entre os resultados experimentais e teóricos. Para os prismas de 2 blocos, 83,3% das amostras permaneceram com relações no intervalo de ± 20%, enquanto nos prismas de 3 blocos apenas 67,7% das amostras mantiveram-se dentro deste intervalo. Cabe ressaltar que uma parcela desta variação é justificada pela própria variabilidade da alvenaria que apresenta em alguns casos uma diferença significativa entre as propriedades de corpos de prova de uma mesma série.

Figura 4.27 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para a resistência à compressão dos prismas de alvenaria

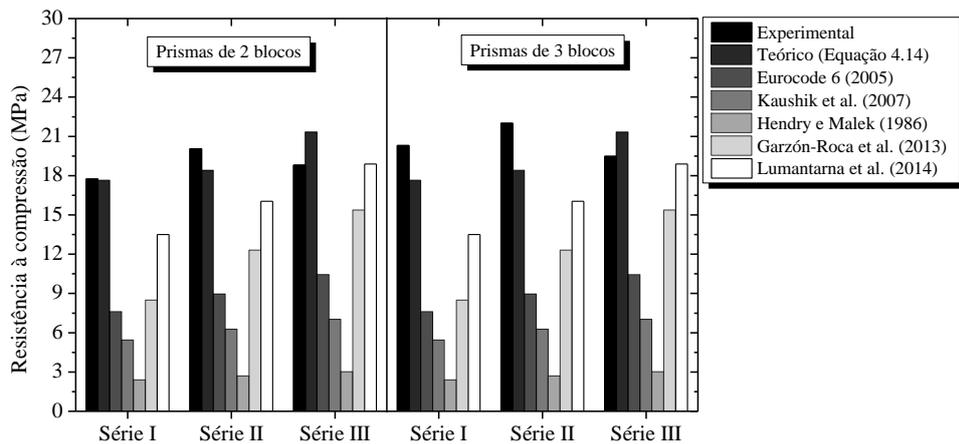


Fonte: Autoria própria.

Ao realizar uma comparação entre o modelo teórico proposto neste trabalho a partir das velocidades ultrassônicas dos materiais constituintes e modelos teóricos propostos a partir

da resistência à compressão destes materiais, notou-se uma elevada discrepância entre os diferentes modelos, o que se justifica pelo fato de que boa parte dos modelos foram idealizados para a alvenaria de tijolos, que possuem uma menor resistência e fogem do contexto atual da realidade brasileira.

Figura 4.28 – Comparação entre diferentes modelos teóricos para previsão da resistência à compressão de prismas de alvenaria

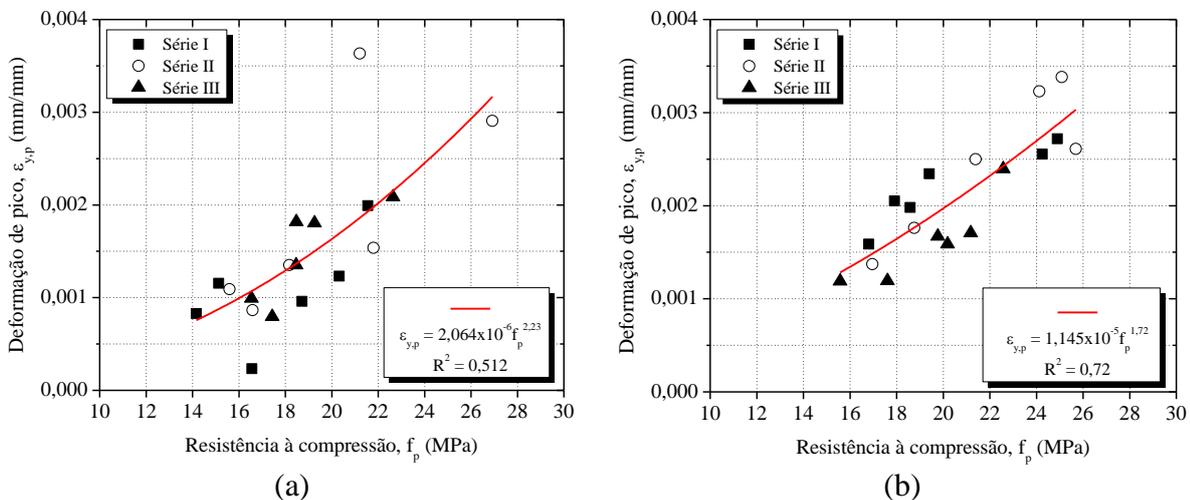


Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Previsão do módulo de elasticidade estático dos prismas em função da VPU dos materiais constituintes

A partir da análise dos diagramas tensão x deformação obtidos na caracterização mecânica dos prismas de alvenaria, observou-se uma discreta relação entre a resistência à compressão destes elementos e a sua respectiva deformação de pico (Figura 4.29). Tais relações, são por sua vez expressas através das Equações 4.11 e 4.12 para os prismas de 2 e 3 blocos, respectivamente.

Figura 4.29 – Relação entre resistência à compressão e deformação de pico em prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos



Fonte: Autoria própria.

(P/ 2 blocos) $\epsilon_{y,p} = 2,064 \times 10^{-6} f_p^{2,23}$ Equação 4.11

(P/ 3 blocos) $\epsilon_{y,p} = 1,145 \times 10^{-5} f_p^{1,72}$ Equação 4.12

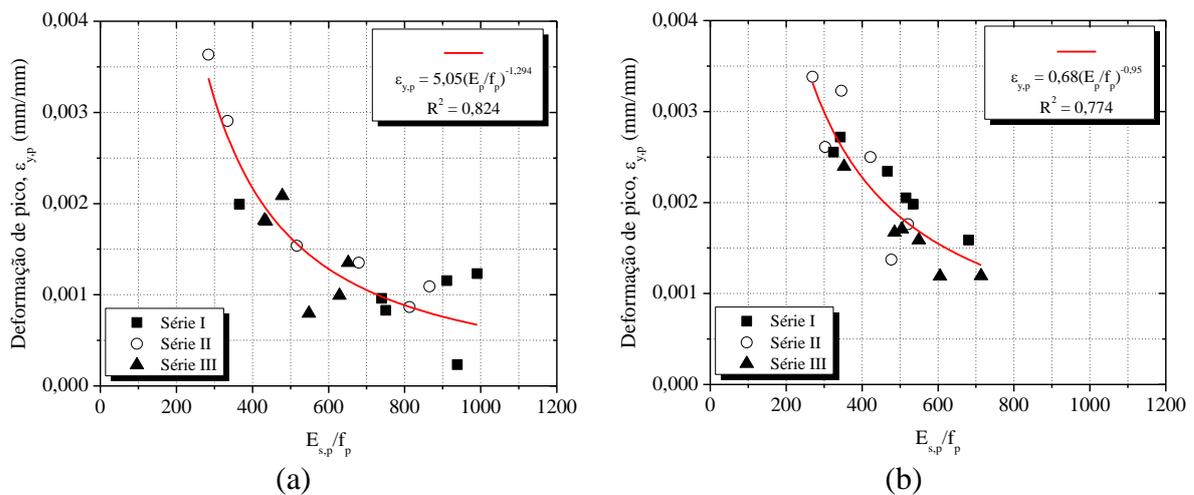
Uma vez que a resistência à compressão dos prismas pode ser dada em função das velocidades ultrassônicas, substituindo a Equação 4.10 nas equações anteriores, é possível obter as Equações 4.13 e 4.14 que relacionam a deformação de pico dos prismas de alvenaria ($\epsilon_{y,p}$) com as velocidades ultrassônicas de ambos os materiais constituintes.

(P/ 2 blocos) $\epsilon_{y,p} = 1,32 \times 10^{-18} (V_{L,b})^{3,122} (V_{L,a}^2 \rho_a)^{0,4181}$ Equação 4.13

(P/ 3 blocos) $\epsilon_{y,p} = 4,5 \times 10^{-15} (V_{L,b})^{2,408} (V_{L,a}^2 \rho_a)^{0,3225}$ Equação 4.14

Além das relações com a resistência à compressão, os ensaios mecânicos nos prismas indicaram que a deformação de pico destes elementos também apresenta razoável ligação com a relação entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à compressão ($E_{s,p}/f_p$), como apontado pelas Equações 4.15 e 4.16, por sua vez representadas na Figura 4.30.

Figura 4.30 – Relação entre a deformação de pico e a razão $E_{s,p}/f_p$ em prismas de alvenaria com (a) 2 blocos e (b) 3 blocos



Fonte: Autoria própria.

(P/ 2 blocos) $\epsilon_{y,p} = 5,05 (E_{s,p} / f_p)^{-1,294}$ Equação 4.15

(P/ 3 blocos) $\epsilon_{y,p} = 0,68 (E_{s,p} / f_p)^{-0,95}$ Equação 4.16

Neste ponto, pode-se observar que o par de Equações 4.13 e 4.14 possibilita a obtenção da deformação de pico dos prismas em função das velocidades de pulso ultrassônico de ambos os materiais constituintes e a Equação 4.10 obtida no item 4.3.1 utiliza tais variáveis para obtenção da resistência à compressão. Dessa forma, ambas as equações podem ser empregadas nas Equações 4.15 e 4.16 com o objetivo de dissociar o módulo de elasticidade

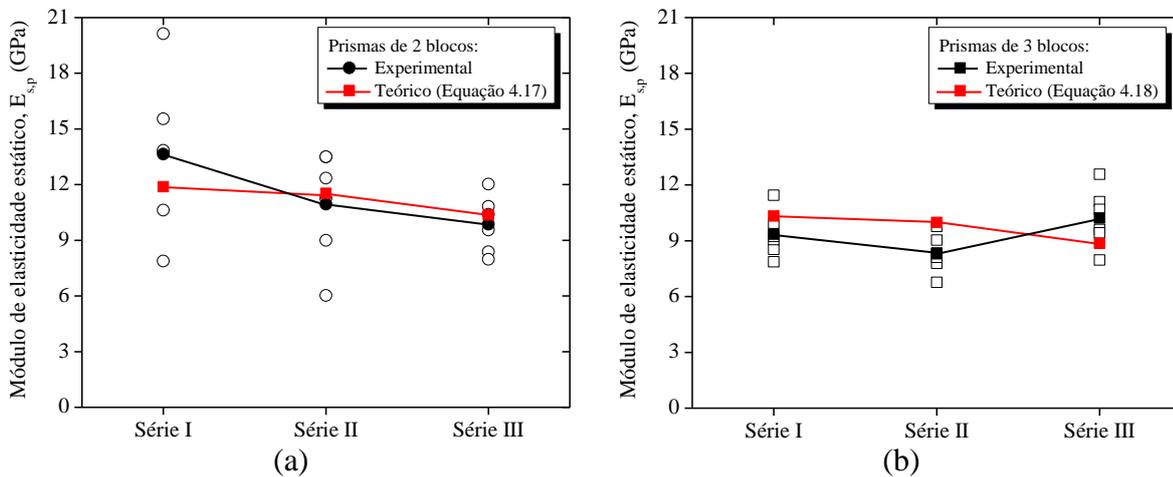
estático ($E_{s,p}$) e também expressá-lo em função das velocidades de pulso ultrassônico dos blocos e da argamassa, como descrito pelas Equações 4.17 e 4.18.

$$(P/ 2 \text{ blocos}) \quad E_{s,p} = 7,81 \times 10^5 (V_{L,b})^{-1,0} (V_{L,a}^2 \rho_a)^{-0,136} \quad \text{Equação 4.17}$$

$$(P/ 3 \text{ blocos}) \quad E_{s,p} = 2,87 \times 10^6 (V_{L,b})^{-1,135} (V_{L,a}^2 \rho_a)^{-0,152} \quad \text{Equação 4.18}$$

De maneira similar àquilo que foi realizado para a resistência à compressão, tais expressões foram comparadas com o resultado das amostras experimentais através da Figura 4.31. Em média, a relação entre os resultados teóricos e experimentais foi de 0,87 para a série I e 1,05 para as séries II e III dos prismas de 2 blocos, enquanto nos prismas de 3 blocos essa diferença foi de 10,5%, 20,2% e 13,4% para as séries I, II e III, respectivamente.

Figura 4.31 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para o módulo de elasticidade estático dos prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos



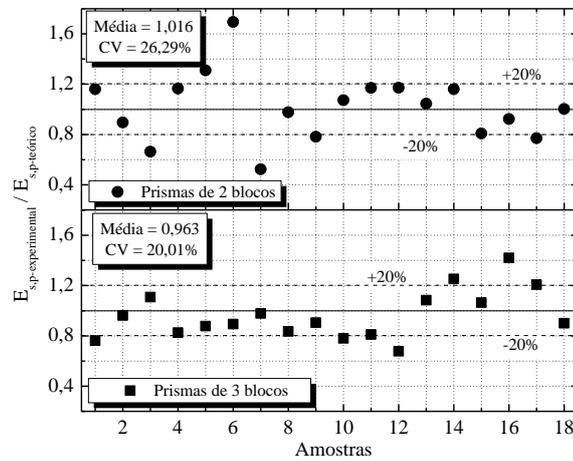
Fonte: Autoria própria.

Apesar dos resultados razoáveis quando comparados à média, faz-se necessário comentar que ao avaliar a relação entre ambos os resultados para todos os corpos de prova individualmente, em alguns casos o modelo teórico divergiu em mais de 60%, como pode ser visto na Figura 4.32. Entretanto, esta diferença ocorreu em casos isolados devido à grande variabilidade de resultados da própria alvenaria, uma vez que tais resultados também se divergiram consideravelmente da própria média experimental da série.

Na literatura técnica, diversos códigos normativos realizam uma estimativa do módulo de elasticidade estático de elementos de alvenaria de acordo com a resistência à compressão deste elemento. De modo a verificar a conformidade entre todos estes modelos teóricos, a Figura 4.33 foi elaborada a partir dos resultados teóricos obtidos neste trabalho, bem como levando em consideração os modelos propostos pela norma brasileira ABNT NBR 16868:2020, norte americana ACI 530-11 (2011), canadense CSA S304.1 (2004) e europeia

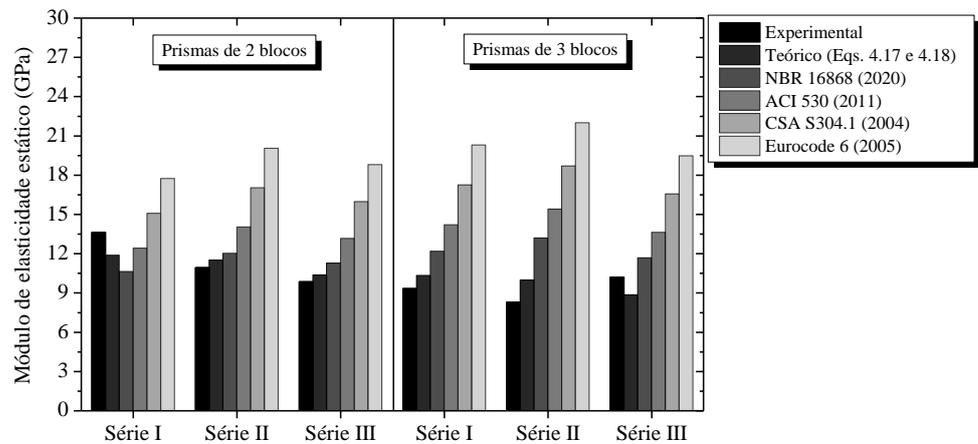
através do Eurocode 6 (2005), em que pôde-se perceber a coerência dos resultados obtidos a partir das Equações 4.17 e 4.18 em relação aos outros modelos disponíveis na literatura.

Figura 4.32 – Relação teórico/experimental individual quanto ao módulo de elasticidade estático dos prismas de alvenaria



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.33 - Comparação entre diferentes modelos teóricos para previsão do módulo de elasticidade estático de prismas de alvenaria



Fonte: Autoria própria.

4.3.3 Previsão do comportamento tensão x deformação dos prismas em função da VPU dos materiais constituintes

Uma vez que as equações propostas anteriormente contemplam a obtenção das propriedades mecânicas f_p , $E_{s,p}$ e $\epsilon_{y,p}$ dos prismas de alvenaria a partir das propriedades dinâmicas dos seus materiais constituintes, e que tais propriedades mecânicas são alguns dos principais parâmetros para obtenção das curvas tensão x deformação dos elementos de alvenaria, este trabalho propõe uma expressão não linear baseada na função Lorentziana para expressar a relação tensão x deformação dos prismas de alvenaria a partir das velocidades de pulso ultrassônico dos seus materiais constituintes, descrita pela Equação 4.19.

$$\sigma = \frac{\delta_1 \delta_2}{4(\varepsilon - \delta_3)^2 + \delta_2^2} + \delta_4 \quad \text{Equação 4.19}$$

Nesta equação, o par (σ, ε) descreve a curva tensão x deformação e as constantes δ_i são parâmetros do modelo, em que δ_1 está relacionado à área sob a curva tensão a deformação, δ_2 é a deformação de pico $\varepsilon_{y,p}$, δ_3 é a deformação última do elemento ($\varepsilon_{u,p}$) e δ_4 é um parâmetro que está associado à linha de base inicial da curva. Uma vez que o modo de ruptura dos prismas foi considerado brusco e explosivo, como descrito no item 4.1.4, considerou-se a deformação última como sendo a própria deformação de pico, ou seja, $\varepsilon_{y,p} = \varepsilon_{u,p}$. Substituindo os parâmetros indicados na Equação 4.19, esta pode ser resumida a:

$$\sigma = \frac{\delta_1 \varepsilon_{y,p}}{4(\varepsilon - \varepsilon_{y,p})^2 + \varepsilon_{y,p}^2} + \delta_4 \quad \text{Equação 4.20}$$

Assumindo que, para a deformação inicial $\varepsilon = 0$, a tensão inicial correspondente vale $\sigma = 0$ e que para $\varepsilon = \varepsilon_{y,p}$, a tensão de pico correspondente vale $\sigma = f_p$, os parâmetros δ_1 e δ_4 podem ser obtidos por meio das Equações 4.21 e 4.22, respectivamente.

$$\delta_1 = \frac{5f_p \varepsilon_{y,p}}{4} \quad \text{Equação 4.21}$$

$$\delta_4 = -\frac{f_p}{4} \quad \text{Equação 4.22}$$

Dessa forma, substituindo as Equações 4.21 e 4.22 na Equação 4.20, a curva tensão x deformação pode ser dada por:

$$\sigma = \frac{f_p}{4} \left[\frac{5\varepsilon_{y,p}^2}{4(\varepsilon - \varepsilon_{y,p})^2 + \varepsilon_{y,p}^2} - 1 \right] \quad \text{Equação 4.23}$$

Dado que no item 4.3.1 a resistência à compressão dos prismas foi relacionada com as velocidades ultrassônicas a partir da Equação 4.10 e que a deformação de pico também pode ser obtida em função das mesmas variáveis através da Equação 4.13 para os prismas de 2 blocos e Equação 4.14 para os prismas de 3 blocos, substituindo ambas as equações na expressão da curva tensão x deformação, esta pode ser dada por:

$$\text{(P/ 2 blocos)} \quad \sigma = \frac{7,4 \times 10^{-36} \varphi_1^{2,45}}{4\varepsilon^2 + \varphi_1(8,7 \times 10^{-30} \varphi_1 - 1,05 \times 10^{-14} \varepsilon)} - \frac{\varphi_1^{0,45}}{11,76 \times 10^5} \quad \text{Equação 4.24}$$

$$\text{(P/ 3 blocos)} \quad \sigma = \frac{8,6 \times 10^{-29} \varphi_2^{2,58}}{4\varepsilon^2 + \varphi_2(1,01 \times 10^{-22} \varphi_2 - 3,6 \times 10^{-11} \varepsilon)} - \frac{\varphi_2^{0,58}}{11,76 \times 10^5} \quad \text{Equação 4.25}$$

Onde:

σ é a tensão na área líquida (em MPa);

ε é a deformação (em ‰);

$$\varphi_1 = (V_{L,b})^{3,122} (\rho_a V_{L,a}^2)^{0,418},$$

$$\varphi_2 = (V_{L,b})^{2,41} (\rho_a V_{L,a}^2)^{0,323},$$

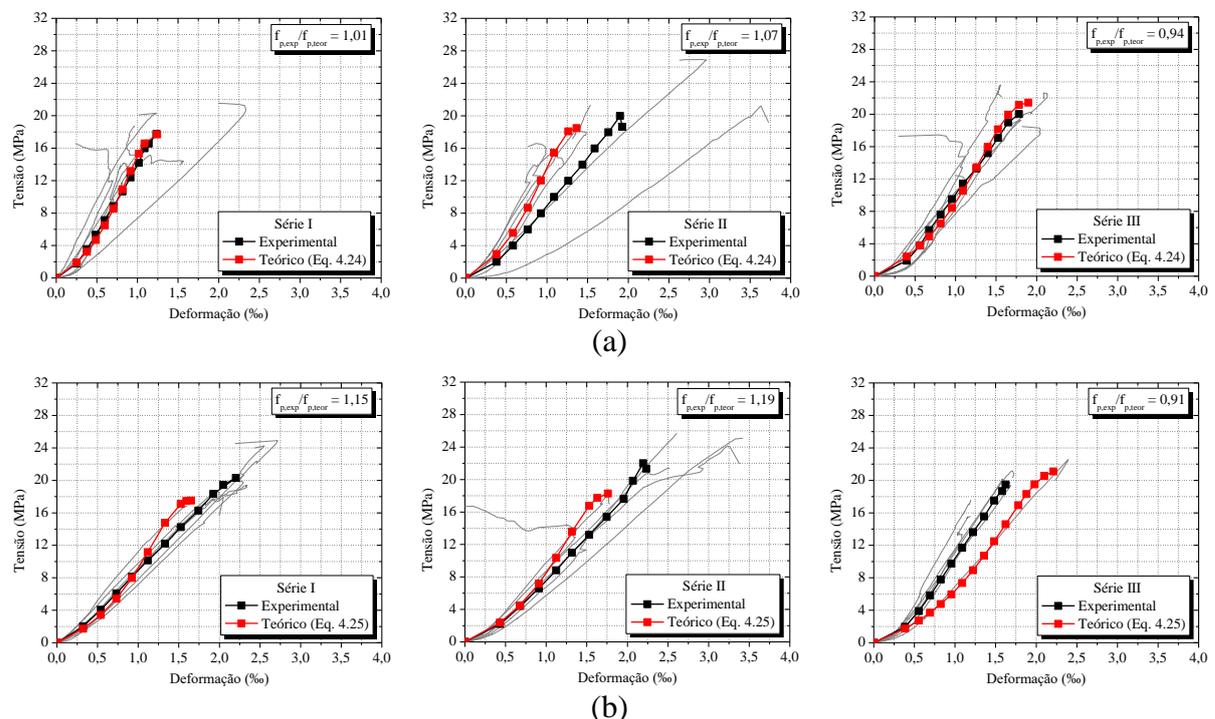
$V_{L,b}$ é a velocidade ultrassônica longitudinal média do bloco cerâmico (em m/s);

$V_{L,a}$ é a velocidade ultrassônica longitudinal da argamassa de assentamento (em m/s);

ρ_a é a densidade específica da argamassa de assentamento (em kg/m³).

Empregando os resultados obtidos para a velocidade de pulso ultrassônico dos blocos e argamassas para cada uma das séries foi possível realizar a obtenção das curvas tensão x deformação teóricas, que por sua vez estão comparadas na Figura 4.34 com as curvas obtidas experimentalmente. De maneira geral, observa-se uma boa concordância entre os resultados teóricos e experimentais, principalmente no que diz respeito ao formato das curvas. Para ambas as geometrias de prismas, as maiores divergências foram observadas para os prismas das séries II que, experimentalmente também apresentaram diferenças mais substanciais tanto para a tensão de ruptura, quanto para a deformabilidade.

Figura 4.34 - Comparação entre as curvas tensão x deformação teóricas e experimentais para os prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos



Fonte: Autoria própria.

4.4 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, realizou-se a apresentação e descrição da segunda etapa do programa experimental que teve como objetivo realizar a caracterização e avaliação ultrassônica de

argamassas de assentamento e prismas de alvenaria estrutural. Dessa forma, prismas de 2 e 3 blocos foram construídos com argamassamento total alternados em três séries com diferentes resistências mecânicas de blocos e argamassas de assentamento.

Inicialmente os elementos foram avaliados quanto às suas propriedades físicas e mecânicas através de ensaios tradicionais e, posteriormente foram avaliados de maneira não destrutiva através de ensaios ultrassônicos utilizando medidas diretas. Nesta etapa, os prismas de alvenaria foram avaliados segundo diferentes pontos ao longo de sua seção transversal e observou-se uma considerável variabilidade na velocidade de pulso ultrassônico ao longo destes pontos.

De maneira geral, os prismas de 3 blocos apresentaram uma VPU inferior àquela obtida nos prismas de 2 blocos por conta da atenuação das ondas ultrassônicas na região da interface em decorrência de efeitos como a reflexão, refração e dispersão das ondas quando em contato com vazios, microfissuras e delaminações originadas de diferentes fatores, como as próprias propriedades dos materiais, execução e condições ambientais de cura.

Finalmente, a partir dos resultados e relações obtidas a partir do programa experimental, um modelo teórico foi proposto para previsão das propriedades mecânicas e do comportamento tensão x deformação dos prismas a partir das velocidades de pulso ultrassônico dos seus materiais constituintes. Tal modelo apresentou razoável conformidade com os resultados médios obtidos experimentalmente, embora tenha apresentado divergências consideráveis para alguns corpos de prova isolados em função da variabilidade natural da alvenaria.

5 ACUSTOELASTICIDADE E AVALIAÇÃO ULTRASSÔNICA SOB TENSÃO: BLOCOS E PRISMAS

Neste capítulo foi descrita a terceira etapa do programa experimental desenvolvido no trabalho, que consistiu em uma avaliação ultrassônica de blocos cerâmicos e prismas de alvenaria submetidos a tensões oriundas de carregamentos de compressão uniaxial. De maneira geral, realizaram-se ensaios mecânicos cíclicos de compressão uniaxial em elementos de alvenaria dos mesmos lotes dos elementos utilizados anteriormente para a caracterização e avaliação ultrassônica sem tensão. Embora tais elementos já tenham sido avaliados de maneira não destrutiva ultrassônica, a aplicação de tensões ocasiona alterações na velocidade de propagação das ondas longitudinais e transversais, conforme a teoria da acustoelasticidade.

Para investigação do efeito acustoelástico, simultaneamente a aplicação do carregamento cíclico, uma avaliação ultrassônica foi realizada nos elementos de alvenaria utilizando medidas diretas e indiretas, com o objetivo de verificar a variação relativa da velocidade conforme o aumento da tensão no material. Dessa forma, neste capítulo será descrita a metodologia utilizada para os ensaios mecânicos, ultrassônicos e extração de resultados, além da discussão dos mesmos.

5.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

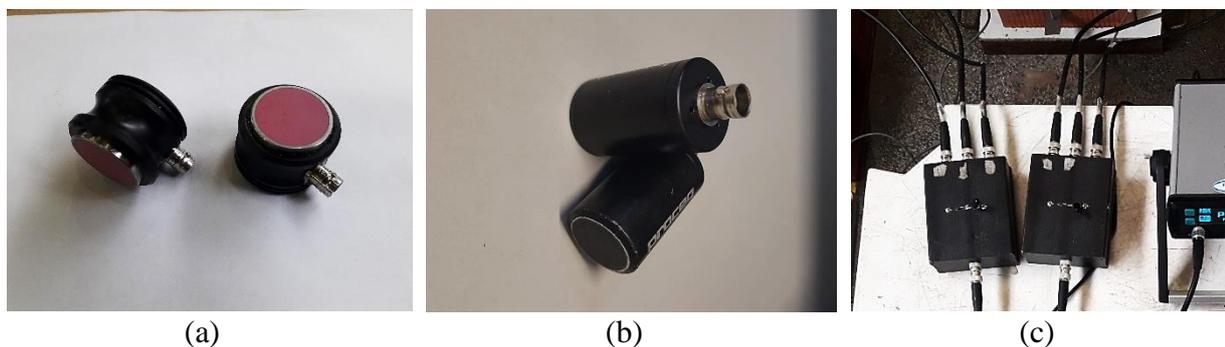
Todos os ensaios para avaliação do efeito acustoelástico nos elementos de alvenaria foram realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, com o objetivo de obter o registro da propagação de ondas ultrassônicas ao longo de blocos, prismas de 2 blocos e de 3 blocos sob tensão.

5.1.1 Materiais e equipamentos

Para a realização destes ensaios, utilizaram-se os mesmos materiais e equipamentos descritos no item 3.1.4, adicionando-se àqueles mais dois pares de transdutores. Dessa forma,

nos ensaios de acustoelasticidade foram utilizados simultaneamente dois pares de transdutores para ondas transversais com frequência nominal de 250 kHz que emitiram ondas transversais e longitudinais ao mesmo tempo e um par de transdutores apenas para ondas longitudinais também com frequência nominal de 250 kHz. Como o aparelho ultrassônico possui entrada/saída apenas para um par de transdutores, uma caixa seletora de sinais foi utilizada acoplada ao aparelho ultrassônico de modo a permitir a realização dos ensaios com a operação dos três pares de transdutores simultaneamente, como apresentado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – (a) Transdutores para ondas transversais, (b) transdutores para ondas longitudinais e (c) caixa seletora de sinais



Fonte: Autoria própria.

No total, foram ensaiados nove blocos cerâmicos e 18 prismas de alvenaria para avaliação do efeito acustoelástico, divididos em ambas as séries e geometrias descritas anteriormente. Os prismas, por sua vez foram construídos com as mesmas especificações detalhadas no item 4.1.2 e foram avaliados quanto ao efeito acustoelástico em idades de aproximadamente 12 meses a partir da data de confecção dos mesmos. A Tabela 5.1 descreve o quantitativo e as especificações dos ensaios realizados para os diferentes corpos de prova.

Tabela 5.1 – Quantidade de corpos de prova avaliados quanto ao efeito acustoelástico

Tipo de elemento	Ensaio	Quantidade de CPs		
		Série I	Série II	Série III
Blocos	Avaliação do efeito acustoelástico	3	3	3
Prismas de 2 blocos	Avaliação do efeito acustoelástico	3	3	3
Prismas de 3 blocos	Avaliação do efeito acustoelástico	3	3	3

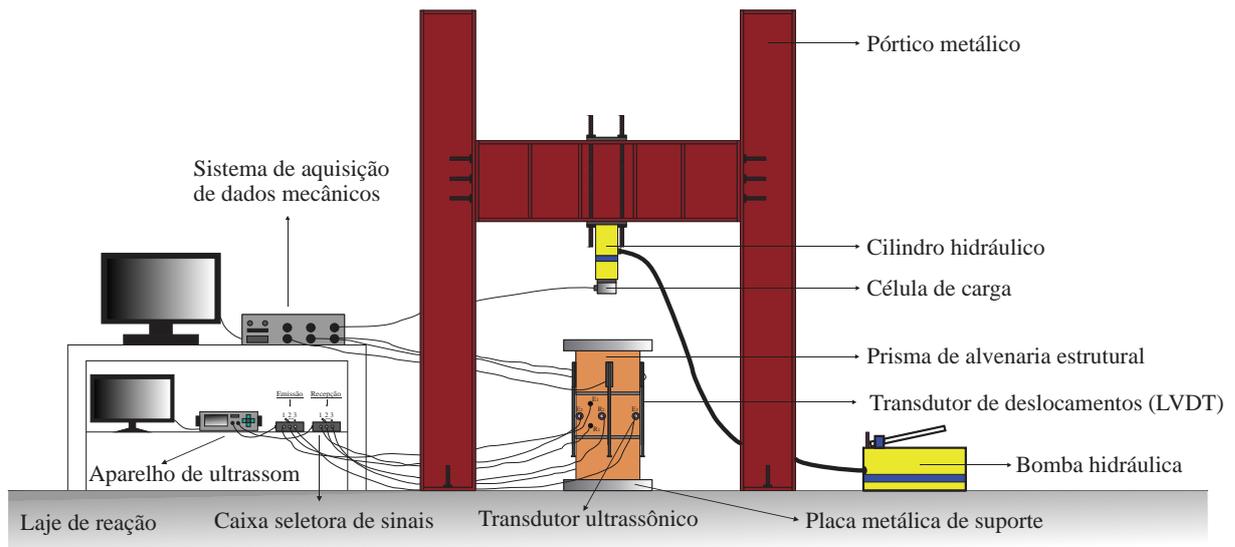
Fonte: Autoria própria.

5.1.2 Ensaios mecânicos

Para aplicação do carregamento, utilizou-se um pórtico metálico sobre uma laje de reação, cujo carregamento foi aplicado através de um conjunto hidráulico composto por um

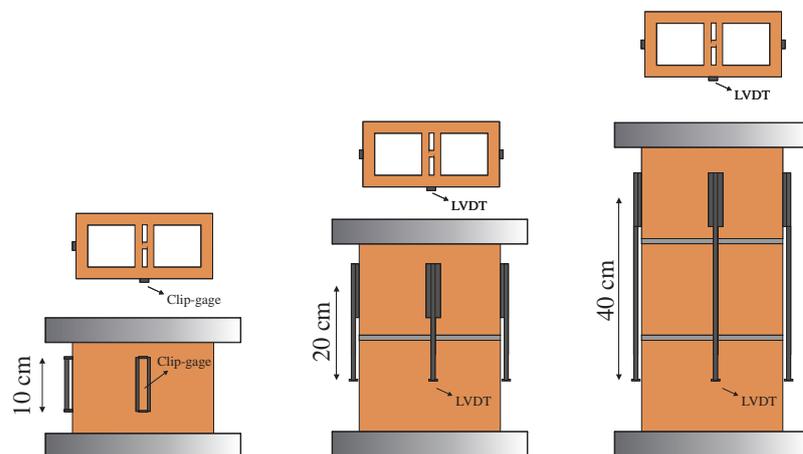
cilindro e uma bomba, por sua vez acionada manualmente, portanto, aplicação do carregamento foi realizado através do controle de força. Para controle do carregamento aplicado, uma célula de carga foi utilizada de maneira acoplada ao cilindro hidráulico. Tais medidas eram aferidas através de um sistema de aquisição de dados mecânicos, que por sua vez também foi utilizado para realizar a leitura dos deslocamentos dos corpos de prova durante o ensaio mecânico, conforme apontado pelo esquema da Figura 5.2.

Figura 5.2 – Esquema de ensaio para avaliação do efeito acustoelástico



Para monitoramento das deformações nos elementos durante a aplicação do carregamento, empregaram-se três transdutores de deslocamento do tipo LVDT, sendo dois distribuídos nas faces laterais e um na face longitudinal dos prismas, e dois *clip-gages* para verificação dos deslocamentos nos blocos, sendo um fixado em uma das faces laterais e o outro fixado em uma das faces longitudinais, ambos na região central de cada uma dessas faces, como ilustrado pela Figura 5.3.

Figura 5.3 – Instrumentação para avaliação mecânica nos elementos de alvenaria



Quanto à aplicação do carregamento, tendo em vista que a teoria da acustoelasticidade foi desenvolvida tomando como base a própria teoria da elasticidade e que os materiais cerâmicos e cimentícios aplicados neste trabalho possuem comportamento usualmente frágil com nível de dano considerável, os ensaios foram realizados até níveis de tensão de aproximadamente 30% da resistência à compressão do elemento. Este valor, embora considerado inicialmente baixo, não se diferencia tanto dos níveis de tensão geralmente empregados na prática nos sistemas em alvenaria estrutural, dado o coeficiente de ponderação das ações para combinações normais $\gamma_f = 1,40$, conforme a ABNT NBR 8681:2003, e o próprio coeficiente de ponderação da resistência do material $\gamma_m = 2,0$ para Estado Limite Último, conforme a ABNT NBR 16868-1:2020. Dessa forma, a Tabela 5.2 apresenta a máxima carga aplicada ($P_{m\acute{a}x}$) durante os ensaios e a tensão máxima correspondente na área bruta ($\sigma_{m\acute{a}x}$).

Tabela 5.2 – Condições de carregamento aplicado conforme elemento de alvenaria

Série	Blocos		Prismas de 2 blocos		Prismas de 3 blocos	
	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
Série I	108 (7,2)	2,65	103,5 (6,9)	2,54	120 (8,0)	2,95
Série II	127,5 (8,5)	3,14	121,5 (8,1)	2,99	135 (9,0)	3,32
Série III	150 (10,0)	3,73	117 (7,8)	2,91	114 (7,6)	2,83

* Os resultados entre parênteses referem-se aos incrementos de carga durante o ensaio (em kN).

Fonte: Autoria própria.

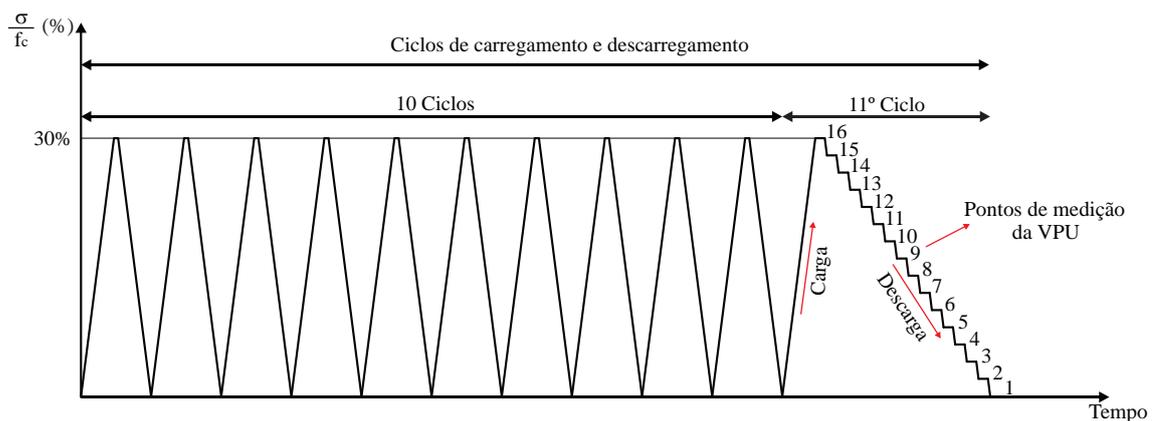
Além disso, em ensaios realizados anteriormente, Bompan (2021) e Resende (2018) observaram uma influência considerável dos ciclos de carregamento e descarregamento na resposta acustoelástica do material. Particularmente, elementos submetidos a carregamentos imediatos apresentam alto nível de danificação inicial e têm o seu efeito acustoelástico reduzido, uma vez que a danificação provoca uma redução na variação relativa de velocidade. Entretanto, com o aumento do nível de carregamento e da quantidade de ciclos de carga e descarga, as microfissuras permanentes que se desenvolvem na estrutura interna do material se acomodam conforme a flutuação do carregamento, e com o aumento dos ciclos de carregamento o efeito acustoelástico torna-se preponderante em relação à danificação do material.

Neste mesmo sentido, em ensaios cíclicos realizados em prismas de concreto simples, Bompan (2021) observou que a resposta acustoelástica se estabilizava a partir de diferentes ciclos de carregamento, variando de 4 a 9 para distintas ondas de propagação. Dessa forma, neste trabalho foram aplicados 10 ciclos iniciais de carga e descarga e a realização das

medidas ultrassônicas para avaliação do efeito acustoelástico foi realizada apenas no 11º ciclo. Por sua vez, neste último ciclo, as medidas ultrassônicas foram realizadas em 16 pontos durante a fase de descarregamento. Dessa forma, a aplicação da carga foi realizada de maneira paulatina, em intervalos de 2% da resistência à compressão média de cada uma das séries de blocos e prismas avaliadas, o que resultou em intervalos de carga variando de 6,9 kN a 10 kN, conforme a Tabela 5.2.

A realização das medições durante a fase de descarregamento também já foi realizada na literatura técnica, como em Bompan (2021) e Gondim (2022) que observaram uma maior taxa de ganho de velocidade em função das tensões durante a fase de descarregamento, tomando como referência a velocidade para um nível nulo de tensões logo após o fim do descarregamento com o objetivo de minimizar o efeito da danificação no material. A Figura 5.4 apresenta o esquema de carregamento aplicado durante o ensaio acustoelástico.

Figura 5.4 – Esquema de aplicação do carregamento durante o ensaio acustoelástico



Fonte: Autoria própria.

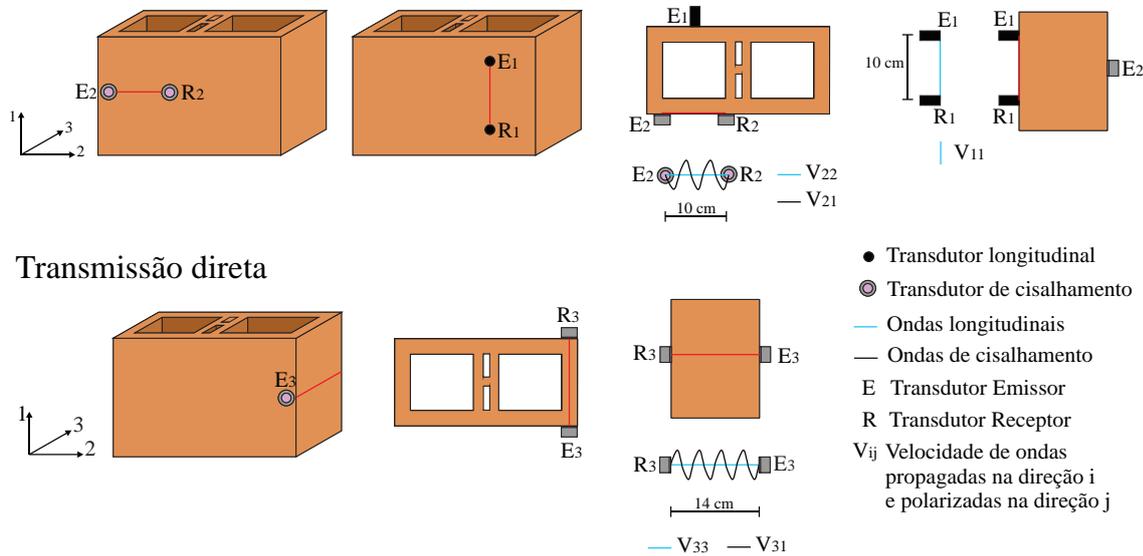
5.1.3 Avaliação ultrassônica

Conforme comentado anteriormente, para a realização das medidas ultrassônicas foram empregados três pares de transdutores simultaneamente em diferentes regiões do corpo de prova. Tais medições foram realizadas através de medidas diretas e indiretas contemplando as três direções ortogonais, como indicado na Figura 5.5.

As medidas de transmissão direta foram realizadas utilizando um dos pares de transdutores de cisalhamento (transversais) que foram fixados de maneira a possibilitar a propagação das ondas ultrassônicas longitudinais e transversais ao longo da largura do corpo de prova, que pode ser melhor visualizado através do posicionamento E_3/R_3 . Por sua vez, estes transdutores possibilitaram a propagação das ondas na direção da largura, com

polarização na direção de aplicação do carregamento (direção 1), culminando na obtenção da velocidade longitudinal V_{33} e da velocidade transversal V_{31} .

Figura 5.5 – Metodologia para avaliação ultrassônica durante o ensaio de acustoelasticidade
Transmissão indireta



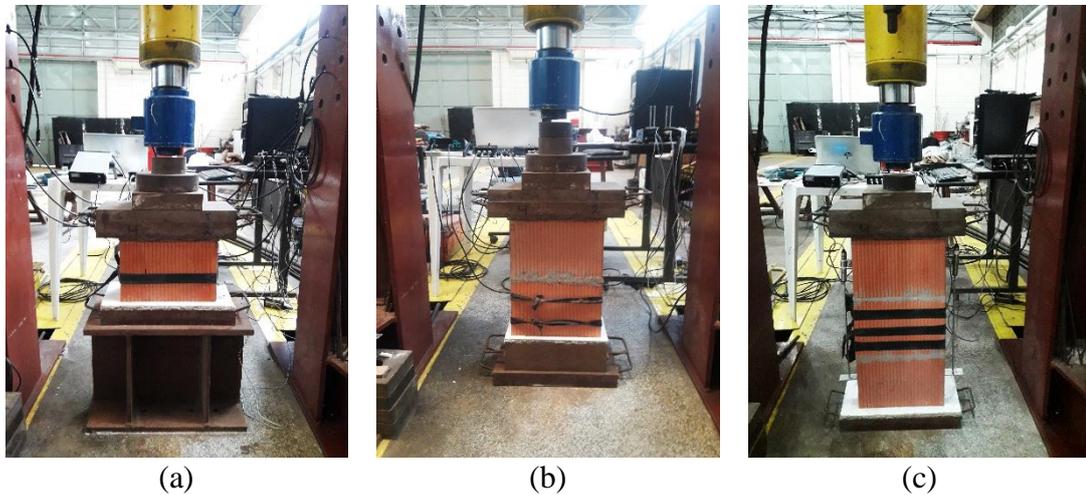
Fonte: Autoria própria.

As medidas de transmissão indireta foram realizadas utilizando o outro par de transdutores de cisalhamento e o par de transdutores para ondas longitudinais ao longo do comprimento e da altura do corpo de prova, respectivamente, e podem ser melhor entendidas através do posicionamento E_2/R_2 e E_1/R_1 . A medida indireta entre os transdutores E_2 e R_2 foi realizada ao longo do comprimento do corpo de prova (direção 2) com os transdutores para ondas de cisalhamento e possibilitou a obtenção da velocidade longitudinal V_{22} e da velocidade transversal V_{21} , sendo esta última polarizada também na direção de aplicação do carregamento. A medida indireta entre os transdutores E_1 e R_1 foi realizada ao longo da altura do corpo de prova (direção 1), ou seja, na mesma direção de aplicação do carregamento e possibilitou a obtenção apenas da velocidade longitudinal V_{11} , uma vez que foi realizada utilizando o par de transdutores para ondas longitudinais. Acrescenta-se ainda que no caso dos prismas de 3 blocos, as medidas foram realizadas apenas no bloco central e no caso dos prismas de 2 blocos as medidas foram realizadas apenas no bloco inferior, com o objetivo de reduzir o efeito das concentrações de tensão nas proximidades da região de aplicação de carga.

Ademais, em todos os ensaios foram utilizadas placas metálicas para distribuição do carregamento ao longo da seção transversal do corpo de prova, a fim de evitar maiores concentrações de tensões por conta do diâmetro relativamente pequeno do cilindro hidráulico de aplicação de carga. Além disso, durante os ensaios também foram utilizados capeamentos

com forro à base de fibra mineral na região de contato entre o elemento e as placas metálicas. O aparato real de ensaio utilizado para os blocos e prismas segue apresentado na Figura 5.6.

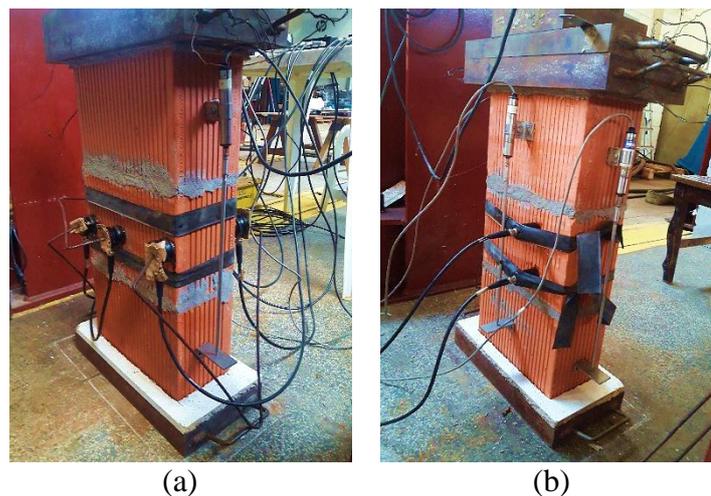
Figura 5.6 – Ensaio acustoelástico em (a) bloco cerâmico (b) prisma de 2 blocos e (c) prisma de 3 blocos



Fonte: Autoria própria.

Quanto aos transdutores ultrassônicos, estes foram fixados utilizando-se prendedores elásticos e metálicos e permaneceram fixos durante toda a aquisição dos sinais ultrassônicos com o objetivo de manter a pressão nos mesmos sem alterações significativas, conforme mostra a Figura 5.7.

Figura 5.7 – Posicionamento dos transdutores ultrassônicos (a) de cisalhamento e (b) longitudinais em prisma de 3 blocos



Fonte: Autoria própria.

5.1.4 Procedimento para extração de resultados

Tendo em vista a discreta variação dos sinais ultrassônicos durante os ensaios de acustoelasticidade, para melhor visualizá-lo, faz-se necessária uma avaliação a respeito da

variação relativa da velocidade de propagação conforme o aumento do nível de tensão. Neste trabalho, esta variação foi analisada por meio da aplicação da função correlação cruzada (*CC*), através do deslocamento de funções entre si, representadas por sua vez pelos próprios sinais ultrassônicos.

A função correlação cruzada, definida pela Equação 5.1, foi utilizada por Snieder *et al.* (2002) e pode ser aplicada para obtenção de pequenas variações relativas de velocidade em meios contínuos após a incidência de alguma perturbação. Dessa forma, avalia-se a função correlação cruzada em função de uma defasagem no tempo de um dos sinais em relação ao outro, resultando na obtenção deste deslocamento Δt no eixo do tempo.

$$CC^{(t,T)}(\Delta t) = \frac{\int_{t-T}^{t+T} u_{np}(t')u_p(t'+\Delta t)dt'}{\sqrt{\int_{t-T}^{t+T} u_{np}^2(t')dt' \int_{t-T}^{t+T} u_p^2(t')dt'}} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

u_{np} é a função do sinal propagado em um meio não perturbado;

u_p é a função do sinal propagado em um meio perturbado;

t é um parâmetro de caracterização do intervalo do sinal que será utilizado para determinar a função correlação cruzada e corresponde ao tempo central do trecho de análise;

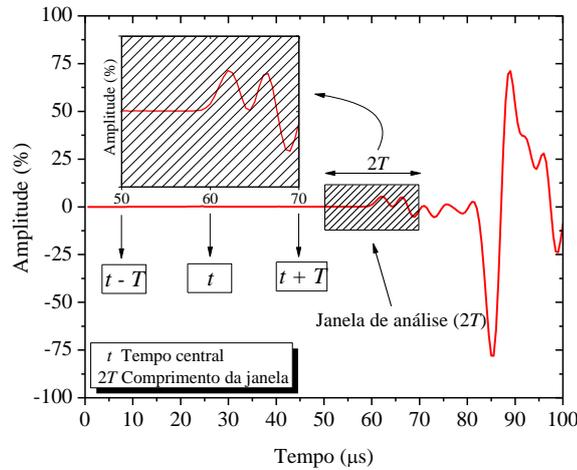
T é um parâmetro de caracterização do intervalo do sinal que será utilizado para determinar a função correlação cruzada e corresponde ao tamanho do trecho de análise.

Dessa forma, a variação relativa da velocidade de propagação ultrassônica pode ser dada pela Equação 5.2, em que Δt é a defasagem de tempo entre os dois sinais e V_0 é a velocidade inicial de referência.

$$\frac{dV}{V_0} = -\frac{\Delta t}{t} \quad \text{Equação 5.2}$$

Para as análises realizadas neste trabalho, utilizou-se o software CWI desenvolvido pelo Prof. Vladimir Guilherme Haach da Escola de Engenharia de São Carlos em 2017. De acordo com Gondim (2022), os valores dos parâmetros de caracterização do intervalo para determinação da função correlação cruzada variam de acordo com o material avaliado e com o comprimento de onda. Nas análises realizadas, definiu-se um trecho de análise de 20 μ s que foi posicionado na região de chegada nas ondas longitudinais e transversais com o objetivo de avaliar a sua variação conforme a elevação do nível de tensão nos elementos, como ilustrado na Figura 5.8. De posse dos resultados analisados, procedeu-se com a geração das curvas acustoelásticas apresentadas no item 5.2.

Figura 5.8 – Metodologia utilizada para análise de resultados a partir da função correlação cruzada (CC)

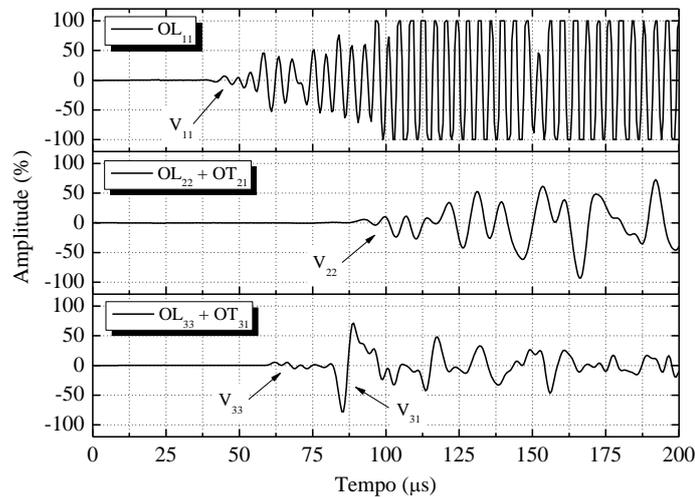


Fonte: Autoria própria.

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Mediante a realização dos ensaios de acustoelasticidade, a Figura 5.9 apresenta os sinais ultrassônicos típicos obtidos para cada uma das ondas analisadas. Observa-se que, utilizando a metodologia de avaliação ultrassônica descrita anteriormente foi possível realizar a transmissão de até cinco ondas ultrassônicas.

Figura 5.9 – Sinais ultrassônicos típicos obtidos durante os ensaios de acustoelasticidade



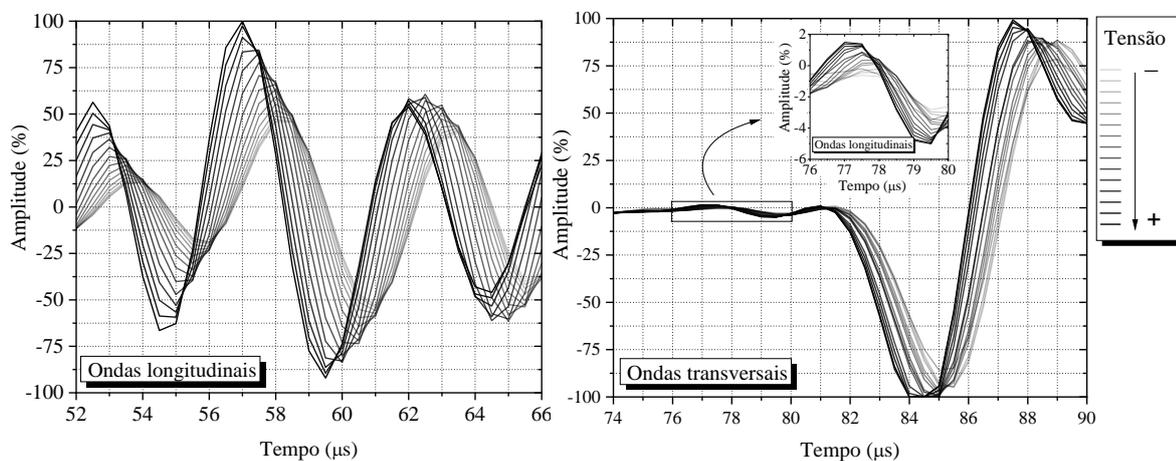
Fonte: Autoria própria.

A primeira delas refere-se à onda longitudinal OL_{11} propagada através dos transdutores longitudinais E_1/R_1 e, conforme a Figura 5.5, refere-se a uma medida indireta realizada ao longo da altura dos elementos. Em seguida, de posse da instrumentação com os transdutores de cisalhamento E_2/R_2 foi possível realizar a transmissão das ondas longitudinais OL_{22} e das ondas transversais OT_{21} . Entretanto, por conta da realização dos ensaios por

medidas indiretas, não foi possível identificar com clareza o instante de chegada das ondas ultrassônicas transversais. Por fim, a utilização dos transdutores ultrassônicos de cisalhamento na medida direta E_3/R_3 tornou possível a obtenção das ondas longitudinais OL_{33} e das ondas transversais OT_{31} . Para esta última medida, da mesma forma que realizado para os blocos cerâmicos durante a avaliação ultrassônica sem tensão descrita no item 3.1.4, realizou-se inicialmente uma medição dedicada à identificação das ondas longitudinais e posteriormente uma outra medida com o objetivo de avaliar apenas à onda transversal.

Após obtenção dos sinais ultrassônicos com a metodologia proposta, foi possível a aquisição de resultados para as velocidades longitudinais segundo cada um dos eixos ortogonais (V_{11} , V_{22} e V_{33}) e também para as ondas transversais (V_{31}). Com a aplicação do carregamento nos elementos de alvenaria, os sinais ultrassônicos típicos sofreram leves alterações tanto na amplitude dos sinais, como no tempo de propagação dos mesmos, conforme o aumento do nível de tensão aplicado. Esta observação pode ser melhor visualizada a partir da especificação de uma determinada região do sinal ultrassônico que indica o instante de chegada das ondas longitudinais e transversais, conforme apresentado pela Figura 5.10.

Figura 5.10 – Sinais ultrassônicos típicos obtidos para ondas longitudinais e transversais sob diferentes níveis de tensão



Fonte: Autoria própria.

Através dos sinais ultrassônicos indicados na Figura 5.10, observa-se mais claramente que as ondas sob baixos níveis de tensão estão levemente deslocadas para a direita dos gráficos, uma vez que apresentaram um atraso em suas respectivas velocidades de propagação por conta do nível de tensão. Ou seja, o aumento do nível de tensão aplicado ocasionou uma redução no tempo de propagação destas ondas e conseqüentemente um aumento na velocidade de propagação ultrassônica das mesmas. Além disso, ondas obtidas para níveis de tensão mais elevados também apresentaram gradativamente um aumento na amplitude do

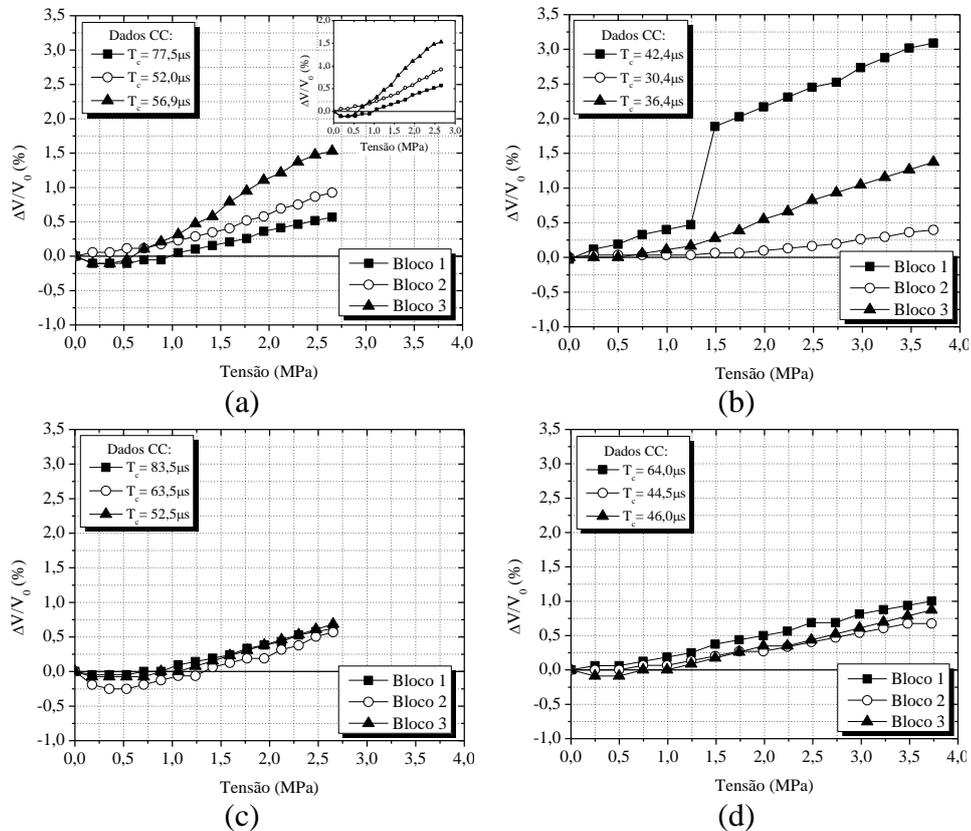
sinal. A variação destes sinais no que diz respeito à velocidade de propagação das ondas caracteriza experimentalmente a observação do efeito acustoelástico nos elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos.

Estes resultados podem ser melhor compreendidos quando avaliados segundo uma variável que representa a variação relativa da velocidade ultrassônica obtida nos elementos sob tensão em relação à velocidade inicial destes elementos livres de tensão ($\Delta V/V_0$). Quando relacionada com o nível de tensão aplicado, esta variação $\Delta V/V_0$ origina às chamadas curvas acustoelásticas, por sua vez discutidas nos próximos itens e especificadas no Apêndice C.

5.2.1 Variação relativa da VPU com a tensão em blocos cerâmicos

A partir da análise dos resultados obtidos através dos ensaios realizados utilizando as medidas indiretas ao longo da altura (V_{11}) e do comprimento dos blocos (V_{22}), observa-se através da Figura 5.11 que o comportamento das curvas acustoelásticas se manteve similar entre as séries I e III, em que foram observadas um aumento da variação relativa da velocidade ultrassônica, conforme o aumento do nível de tensão aplicado.

Figura 5.11 – Variação relativa da VPU para (a)/(b) V_{11} e (c)/(d) V_{22} das séries I e III



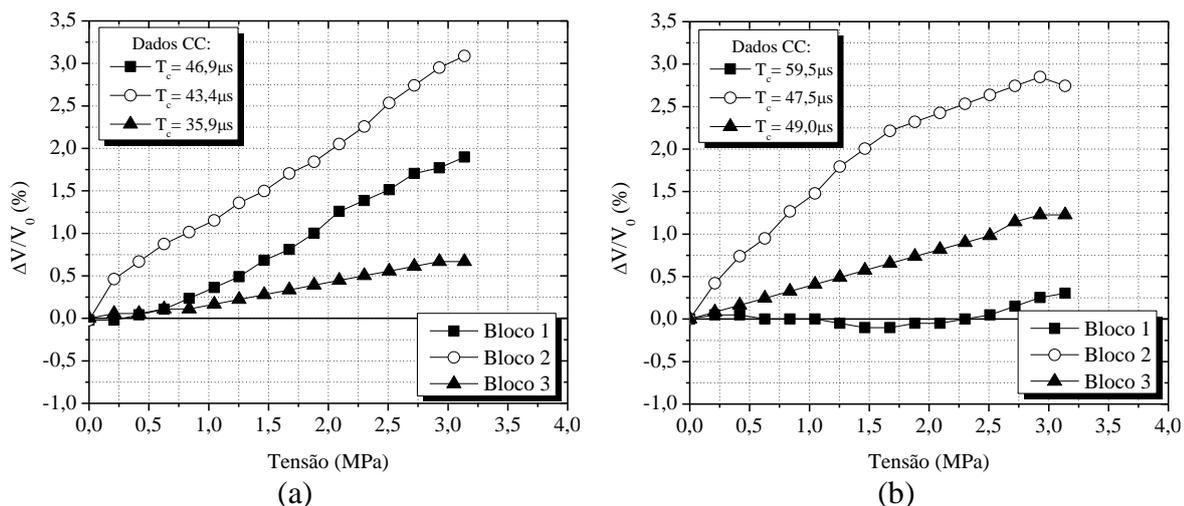
Fonte: Autoria própria.

Apesar da similaridade no formato das curvas, observa-se uma maior variação relativa da velocidade para as ondas longitudinais V_{11} que foram propagadas na mesma direção de aplicação do carregamento. Para estas ondas, a máxima variação relativa observada foi de 1,53% para os blocos da série I e 1,37% para os blocos da série III, enquanto para as ondas longitudinais V_{22} essa variação máxima foi de 0,69% e 1,0% para as séries I e III, respectivamente.

Neste ponto, cabe mencionar a discrepância entre o comportamento da curva referente à velocidade V_{11} do bloco 1 da série III, indicado na Figura 5.11b, que apresentou uma defasagem vertical entre dois níveis de tensão adjacentes. Esta diferença não está ligada ao efeito acustoelástico e diz respeito ao fato de que durante o ensaio de acustoelasticidade, os transdutores longitudinais utilizados para aquisição dos sinais se desprenderam e precisaram ser reposicionados. Dessa forma, há uma defasagem entre ambos os trechos, mas percebe-se uma taxa de elevação similar da variação relativa entre os dois trechos. Por conta desta diferença, a defasagem não foi considerada na avaliação da máxima variação, que permaneceu sendo 1,37% do bloco 3, como indicado anteriormente.

Esta diferença na curva acustoelástica por conta do reposicionamento dos transdutores manifesta a sensibilidade do efeito acustoelástico segundo diversos tipos de fatores que podem ocorrer durante os ensaios. Tal sensibilidade também foi presenciada na avaliação das ondas V_{11} e V_{22} nos blocos da série II, como mostra a Figura 5.12.

Figura 5.12 – Variação relativa da VPU para (a) V_{11} e (b) V_{22} da série II



Fonte: Autoria própria.

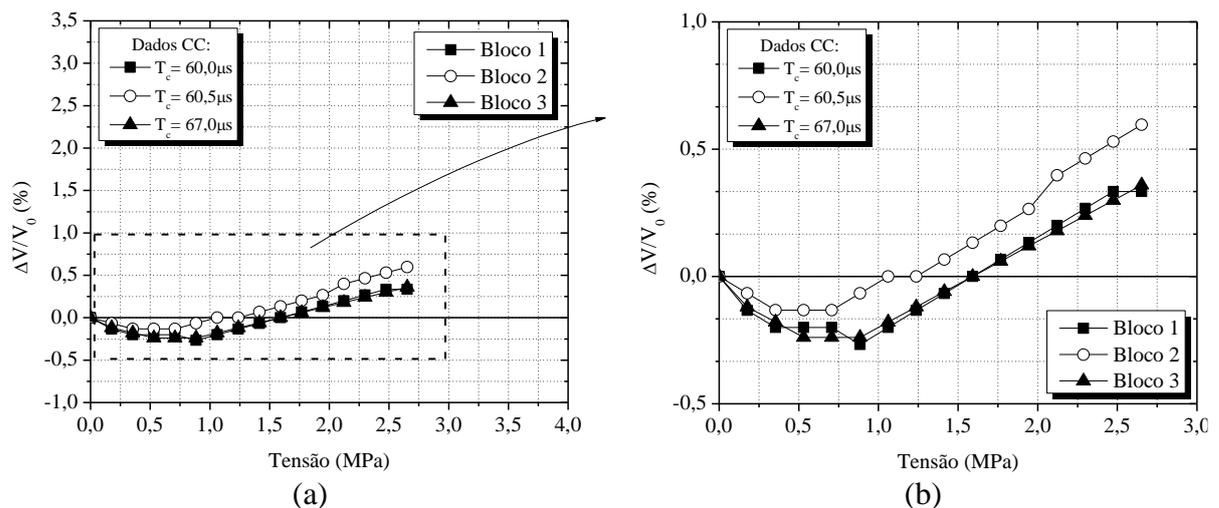
Para esta série II de blocos cerâmicos foi observada uma grande variação nos resultados das curvas acustoelásticas. Uma vez que todos os blocos foram submetidos à mesma metodologia de ensaio, com comportamento mecânico similar, e que os blocos da série II apresentaram uma resistência à compressão e rigidez intermediários entre as séries I e

III, tal variação não parece ter ligação com o comportamento mecânico das unidades. Além disso, para os três blocos de uma mesma série foram observadas diferenças significativas tanto no comportamento da curva acustoelástica, quanto na própria variação relativa de velocidade, o que ratifica os efeitos significativos que podem ocorrer por conta de fatores diversos, bem como pela própria variabilidade da alvenaria e heterogeneidade do material de um mesmo bloco, que ocasionam grandes variações inclusive em elementos de uma mesma série de resistência.

A maior variação relativa de velocidade na análise das ondas V_{11} em relação às ondas V_{22} também já foi verificada experimentalmente por outras pesquisas realizadas no concreto simples por Lillamand *et al.* (2010), Schiavon (2015), Bompan (2021) e Zhong *et al.* (2021), que ratificam a maior sensibilidade das curvas acustoelásticas às ondas propagadas na mesma direção de aplicação do carregamento.

No tocante ao comportamento das curvas acustoelásticas, observou-se de maneira discreta um comportamento não linear no início das curvas acustoelásticas das ondas V_{11} e V_{22} . Este comportamento difere daquele linear teoricamente previsto para o efeito, como descrito por Hughes e Kelly (1953). Tal comportamento não linear foi mais ainda mais pronunciado nas ondas V_{33} , que por sua vez referem-se às ondas longitudinais obtidas por medidas diretas realizadas ao longo da largura dos blocos cerâmicos, como ilustrado na Figura 5.13.

Figura 5.13 – Variação relativa da VPU para a onda V_{33} da série I



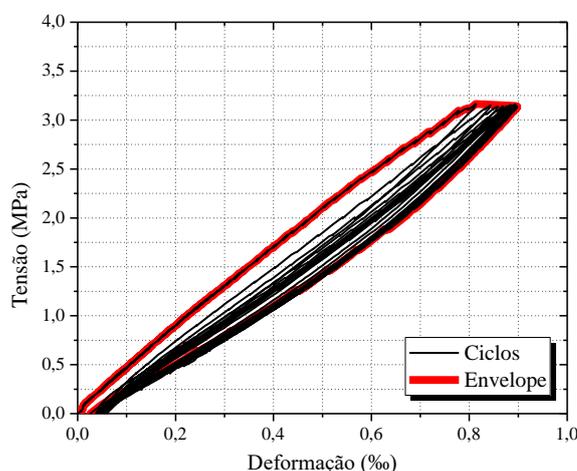
Fonte: Autoria própria.

Tal fenômeno também foi observado nas demais séries de blocos cerâmicos, embora de forma mais pronunciada em alguns elementos do que em outros. Este comportamento também foi verificado em outras pesquisas ligadas à investigação de materiais frágeis como o

concreto em Schiavon (2015) e Bompan (2021), bem como na avaliação de elementos de alvenaria formados por blocos de concreto, como apresentado em Gondim (2022). De maneira, este fenômeno ainda não está completamente esclarecido, mas acredita-se que esteja relacionado à danificação do material.

Embora os ensaios de acustoelasticidade tenham sido realizados com a aplicação de carregamento até níveis de tensão da ordem de 30% da resistência dos elementos, ao analisar as curvas tensão x deformação dos mesmos durante os ciclos de carregamento e descarregamento descritos na Figura 5.4, observou-se a presença de deformações residuais após a aplicação dos ciclos, como apresenta a Figura 5.14, o que indica a presença de algum nível de danificação nestes elementos.

Figura 5.14 – Curva tensão x deformação típica durante os ensaios de acustoelasticidade



Fonte: Autoria própria.

Para avaliação do nível de dano nestes elementos, calculou-se o módulo de elasticidade estático dos ramos da curva envelope definida pela fase de carregamento do 1º ciclo de carga e pela fase de descarregamento do 11º, que por sua vez foi aquele utilizado para realização dos ensaios ultrassônicos. Para ambos os trechos, o módulo de elasticidade foi dado como o módulo secante calculado no trecho da curva entre 5% e 33% da resistência última do elemento, conforme recomendações do ACI 530-11 (2011). Para esta análise específica, uma vez que o carregamento só foi aplicado até o nível de 30% da resistência dos blocos, adaptou-se o trecho de análise para aquele situado entre 5% e 30%.

De posse destes resultados, uma estimativa do nível de danificação nos elementos foi calculada a partir da relação entre ambos os módulos de elasticidade, conforme a Equação 5.3. Tal relação exprime a perda de rigidez do último ciclo de carga onde a avaliação ultrassônica foi realizada em relação ao primeiro ciclo de carga aplicado nos mesmos elementos.

$$D = 1 - \frac{E_{11^\circ}}{E_{1^\circ}} \quad \text{Equação 5.3}$$

Onde:

D é o nível de dano estimado (em %);

E_{11° é o módulo de elasticidade estático da fase de descarregamento do 11º ciclo (em GPa);

E_{1° é o módulo de elasticidade estático da fase de carregamento do 1º ciclo de carga (em GPa).

Diante disso, identificou-se que para os blocos cerâmicos investigados, o nível de danificação dos mesmos foi de até 12,78% em algumas unidades, o que ficou comprovado também pelo fato de que durante alguns ensaios de acustoelasticidade, observou-se o aparecimento de fissuras verticais ao longo das paredes externas destes elementos, conforme a Figura 5.15. Ou seja, embora o nível de tensão aplicado tenha sido de até 30% da resistência destas unidades, ainda foi perceptível algum nível de danificação localizada em algumas delas. Acrescenta-se aqui que tais fissuras ocorreram durante a aplicação do 1º ciclo de carga e permaneceram acomodadas durante o restante do ensaio.

Figura 5.15 – Danos localizados durante os ensaios de acustoelasticidade



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, a danificação atua de maneira contrária ao efeito acustoelástico, uma vez que promove a redução da velocidade relativa conforme o aumento de tensão. Esta não linearidade pode ser justificada nos trechos iniciais das curvas acustoelásticas nas situações em que o efeito do dano se sobrepõe ao próprio efeito acustoelástico. No decorrer do ensaio, com o aumento da variação relativa de velocidade, o efeito acustoelástico torna-se mais considerável e se impõe sobre o efeito provocado pela danificação, o que ocasiona em um aumento de $\Delta V/V_0$.

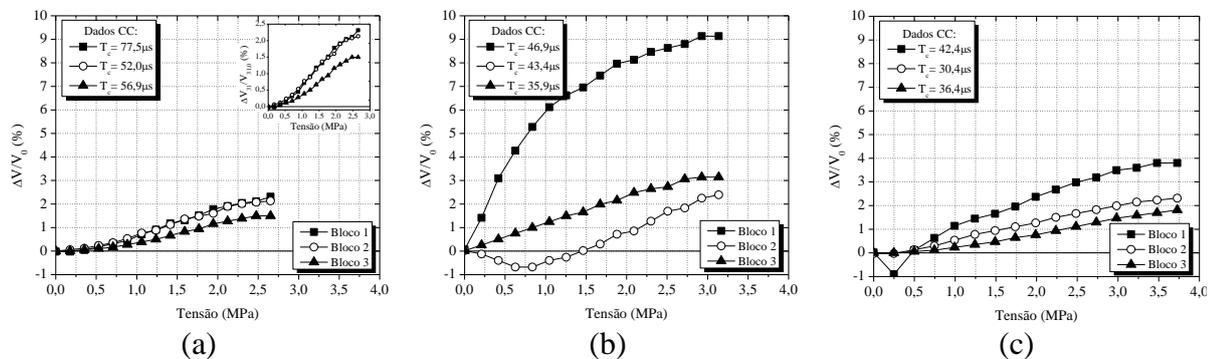
Além da presença da não linearidade no trecho inicial das curvas acustoelásticas, observa-se através da Figura 5.13 que a variação relativa de velocidade das ondas V_{33} foi menor do que aquela variação relatada anteriormente para as ondas aferidas através de

medidas indiretas. Isto leva a hipótese de que nas ondas mais sensíveis ao efeito acustoelástico, o dano é menos perceptível e, portanto, a não linearidade inicial das curvas acustoelásticas é menor. Neste mesmo sentido, as ondas V_{11} e V_{22} mostraram-se mais sensíveis ao efeito acustoelástico e por isso apresentaram uma não linearidade inicial mais discreta.

Ao analisar até que nível de tensão as curvas acustoelásticas apresentavam uma variação relativa da VPU negativa, observou-se que a não linearidade inicial nas ondas V_{33} foi até 20,02% da resistência última, enquanto variou até 14,94% nos resultados obtidos nas ondas V_{22} e até 10,94% nos resultados das ondas V_{11} , o que confirma uma maior sensibilidade destas últimas à identificação do efeito acustoelástico.

Ainda no contexto da variação relativa de velocidade, observou-se que as maiores variações nos blocos cerâmicos foram obtidas para as ondas transversais V_{31} , especificadas através das curvas acustoelásticas na Figura 5.16. Para estas ondas, exceto para um dos blocos da série II, não foi possível notar a presença de uma não linearidade inicial nas curvas acustoelásticas, o que denota uma maior sensibilidade destas ondas na identificação e avaliação do efeito.

Figura 5.16 – Variação relativa da VPU para a onda V_{31} nas séries (a) I, (b) II e (c) III



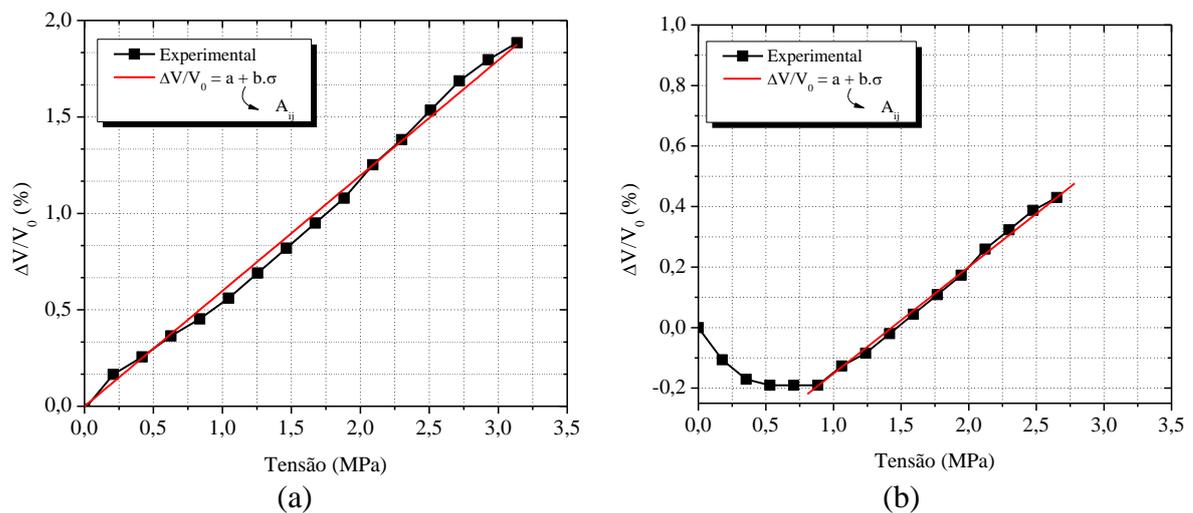
Fonte: Autoria própria.

No que diz respeito à própria variação relativa da velocidade nestas ondas, esta foi de até 2,31% e 3,80% para as séries I e III, respectivamente. Para a série II, um bloco isolado apresentou uma variação relativa de velocidade de até 9,14%, sendo este um valor muito elevado quando comparado às variações relativas deste próprio trabalho e de outras pesquisas relatadas na literatura. Para os outros dois blocos da mesma série, a máxima variação relativa foi de 3,15%, o que se encontra na mesma ordem de grandeza dos demais blocos avaliados nas outras séries. Este comportamento também já foi relatado por autores como Bompan e Haach (2018) e Lillamand *et al.* (2010), que já haviam observado que as ondas polarizadas na

direção do carregamento apresentam maior sensibilidade ao efeito acustoelástico, que é o caso das ondas transversais V_{31} .

A partir das curvas acustoelásticas apresentadas anteriormente, a obtenção dos coeficientes acustoelásticos (A_{ij}) foi realizada a partir da inclinação de uma regressão linear estabelecida para os pontos que definem cada uma das curvas acustoelásticas. Neste sentido, para a obtenção dos coeficientes A_{ij} referentes à cada uma das ondas, utilizou-se a mesma metodologia estabelecida por Bompan e Haach (2018), ou seja, realizando uma regressão completo cobrindo todos os pontos da curva para as ondas que não apresentaram não linearidade inicial e, desprezando aqueles pontos cuja a taxa de variação relativa da velocidade fosse negativa, no caso das ondas que apresentaram um comportamento não linear inicial, como ilustrado através da Figura 5.17.

Figura 5.17 – Metodologia para obtenção dos coeficientes acustoelásticos



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5.3 apresenta os coeficientes acustoelásticos obtidos para cada um dos blocos analisados, segundo as quatro ondas ultrassônicas investigadas. Neste ponto, é importante mencionar que quanto maior o coeficiente acustoelástico, maior é a sensibilidade de uma onda ao efeito acustoelástico, ou seja, maior será a variação relativa da velocidade desta referida onda quando submetida a tensões.

A respeito dos coeficientes acustoelásticos, pode-se observar que todas as curvas analisadas apresentaram um alto coeficiente de determinação R^2 , o que indica uma boa linearidade das curvas acustoelásticas no trecho com taxas positivas de variação relativa de velocidade. Entretanto, também é notória a grande variabilidade dos resultados para uma mesma série de blocos, o que manifesta a dificuldade de avaliação do efeito em amostras com um baixo número de corpos de prova, utilizando um material com alta variabilidade.

Tabela 5.3 – Coeficientes acustoelásticos individuais para cada bloco cerâmico

Série	Bloco	A ₁₁	A ₂₂	A ₃₃	A ₃₁
Série I	1	0,30 (0,975)	0,26 (0,985)	0,36 (0,993)	0,98 (0,985)
	2	0,36 (0,964)	0,36 (0,980)	0,34 (0,906)	0,91 (0,987)
	3	0,74 (0,988)	0,33 (0,951)	0,31 (0,982)	0,65 (0,973)
Série II	1	0,68 (0,981)	0,25 (0,919)	1,12 (0,954)	2,64 (0,874)
	2	0,93 (0,992)	0,88 (0,934)	0,82 (0,974)	1,34 (0,987)
	3	0,23 (0,987)	0,41 (0,996)	0,31 (0,985)	1,06 (0,990)
Série III	1	0,96 (0,920)	0,28 (0,992)	-	1,26 (0,951)
	2	0,10 (0,880)	0,20 (0,977)	0,36 (0,926)	0,69 (0,992)
	3	0,41 (0,965)	0,28 (0,987)	0,24 (0,968)	0,54 (0,981)

* Os resultados entre parênteses referem-se aos coeficientes de determinação (R²).

Fonte: Autoria própria.

Por conta da grande variabilidade dos resultados, os coeficientes acustoelásticos médios foram calculados a partir dos resultados obtidos em cada um dos três blocos de cada uma das séries e apresentados na Tabela 5.4. Para tais coeficientes acustoelásticos, notou-se que a grande variabilidade dos resultados individuais e o número reduzido de corpos de prova ocasionaram em altos coeficientes de variação.

Tabela 5.4 – Coeficientes acustoelásticos médios para cada série de resistência

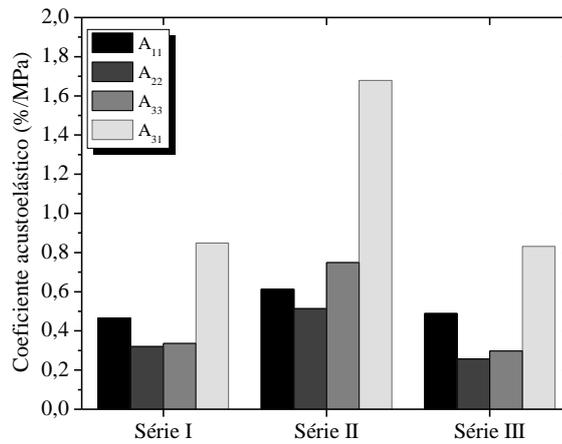
Série	Bloco	A ₁₁	A ₂₂	A ₃₃	A ₃₁
Série I	Média	0,47 (0,985)	0,32 (0,983)	0,34 (0,976)	0,85 (0,985)
	CV	51,6%	16,5%	8,10%	20,3%
Série II	Média	0,61 (0,996)	0,51 (0,987)	0,74 (0,990)	1,68 (0,980)
	CV	57,5%	63,8%	55,1%	50,3%
Série III	Média	0,49 (0,965)	0,28 (0,982)	0,30 (0,968)	0,83 (0,984)
	CV	88,6%	17,9%	29,4%	45,9%

* Os resultados entre parênteses referem-se aos coeficientes de determinação (R²).

Fonte: Autoria própria.

Os coeficientes acustoelásticos médios apresentados anteriormente foram ilustrados na Figura 5.18 para uma melhor visualização. De modo geral, observa-se que para todas as ondas verificadas, os maiores coeficientes acustoelásticos foram aqueles obtidos para o conjunto de blocos de série II. Neste mesmo sentido, as ondas V₃₁ foram aquelas que originaram os maiores coeficientes acustoelásticos, seguidas pelas ondas V₁₁, onde as medidas também foram realizadas na mesma direção de aplicação do carregamento. Por outro lado, as ondas V₂₂ e V₃₃ foram aquelas apresentaram menor sensibilidade ao efeito acustoelástico, uma vez que foram propagadas ao longo do comprimento e da largura dos blocos, respectivamente.

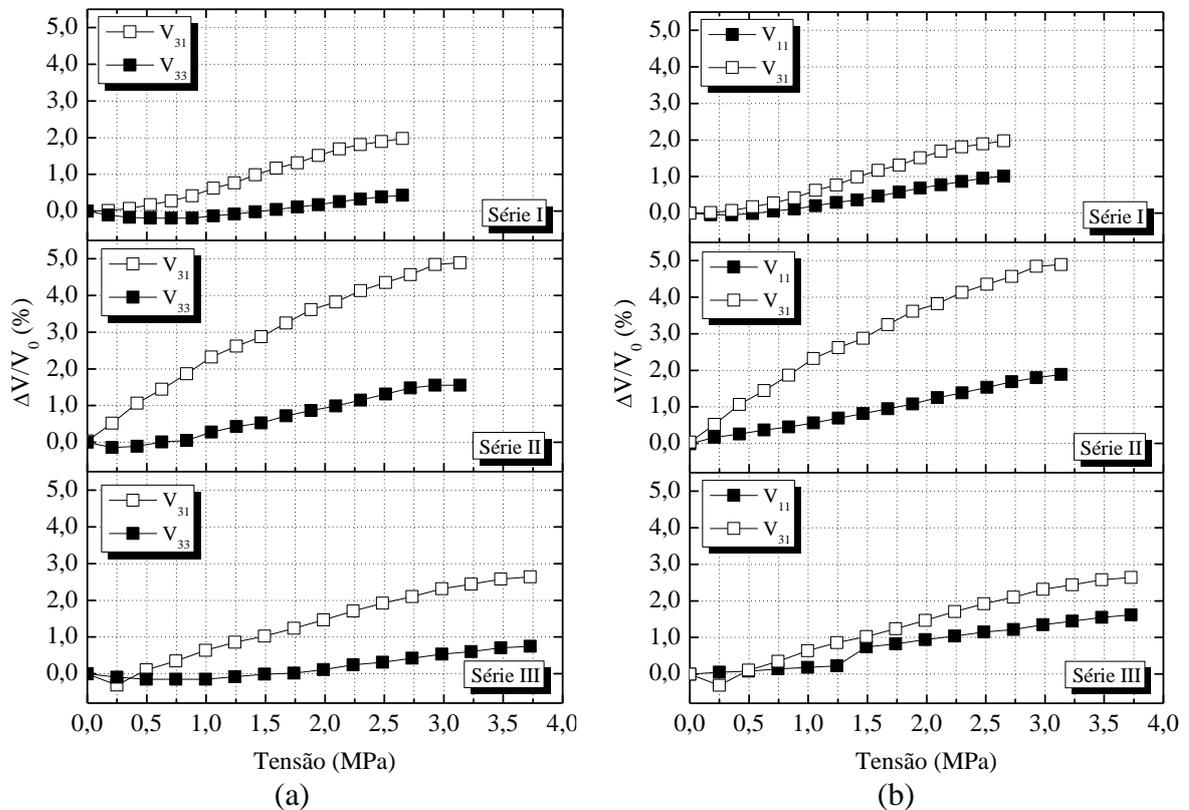
Figura 5.18 – Variação dos coeficientes acustoelásticos médios dos blocos cerâmicos



Fonte: Autoria própria.

Apesar da grande variabilidade dos resultados, através das curvas acustoelásticas médias obtidas para cada série de resistência foi possível identificar algumas tendências apresentadas para as curvas acustoelásticas. Na comparação entre as ondas V_{31} e V_{33} apresentada na Figura 5.19a foi possível observar uma diferença significativa entre as curvas acustoelásticas de duas ondas obtidas através da mesma medida.

Figura 5.19 – Comparação entre as ondas (a) V_{31} e V_{33} e (b) V_{31} e V_{11}



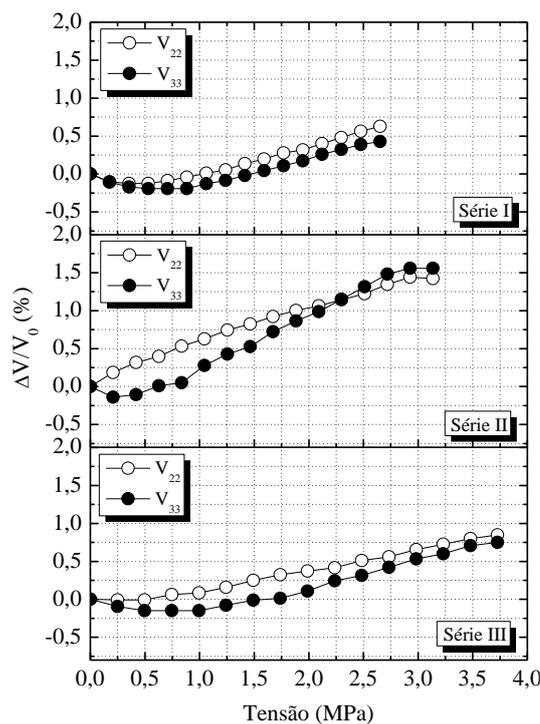
Fonte: Autoria própria.

Neste caso, as ondas transversais V_{31} em todos os casos mostraram-se mais sensíveis às ondas longitudinais V_{33} , mesmo com ambas sendo aferidas através da mesma medida, o

que demonstra uma maior sensibilidade ao efeito acustoelástico das ondas de cisalhamento polarizadas na mesma direção de aplicação do carregamento. Comparando estas ondas transversais V_{31} obtidas através da polarização das partículas na direção do carregamento com as ondas longitudinais V_{11} obtidas através da propagação das partículas também na direção do carregamento, pôde-se observar que as ondas de cisalhamento também apresentaram uma maior sensibilidade ao efeito acustoelástico, como indica a Figura 5.19b.

Neste mesmo contexto, ao comparar as curvas acustoelásticas entre as ondas de menor sensibilidade ao efeito acustoelástico, observou-se que ambas apresentaram um comportamento acustoelástico muito similar, o que vai ao encontro entre a similaridade entre as velocidades longitudinais obtidas ao longo do comprimento e da largura, como mostra a Figura 5.20. Entretanto, de maneira discreta constatou-se que as ondas aferidas através de medidas indiretas (V_{22}) mostraram-se menos propícias à não linearidade inicial. Dessa forma, as medidas indiretas apresentaram-se como uma boa alternativa para verificação do efeito.

Figura 5.20 – Comparação entre as ondas V_{22} e V_{33}



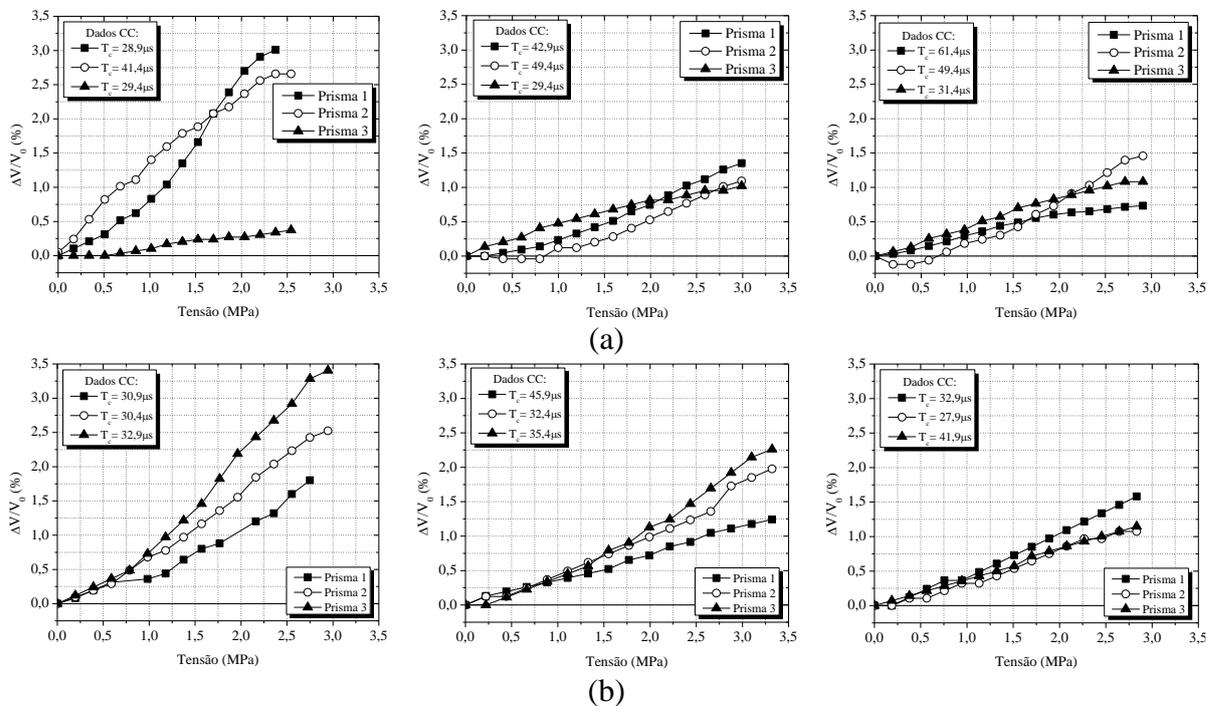
Fonte: Autoria própria.

5.2.2 Variação relativa da VPU com a tensão em prismas de alvenaria

De maneira similar àquilo que foi realizado nos blocos cerâmicos, os prismas de alvenaria também tiveram suas curvas acustoelásticas avaliadas por meio da metodologia descrita anteriormente. Na análise das ondas V_{11} , que são aquelas obtidas através de medições indiretas realizadas na direção de aplicação do carregamento, observou-se um comportamento

similar das curvas acustoelásticas entre os prismas de 2 e 3 blocos, conforme apresentado na Figura 5.21.

Figura 5.21 – Variação relativa da VPU para a onda V_{11} nas séries I, II e III em prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos



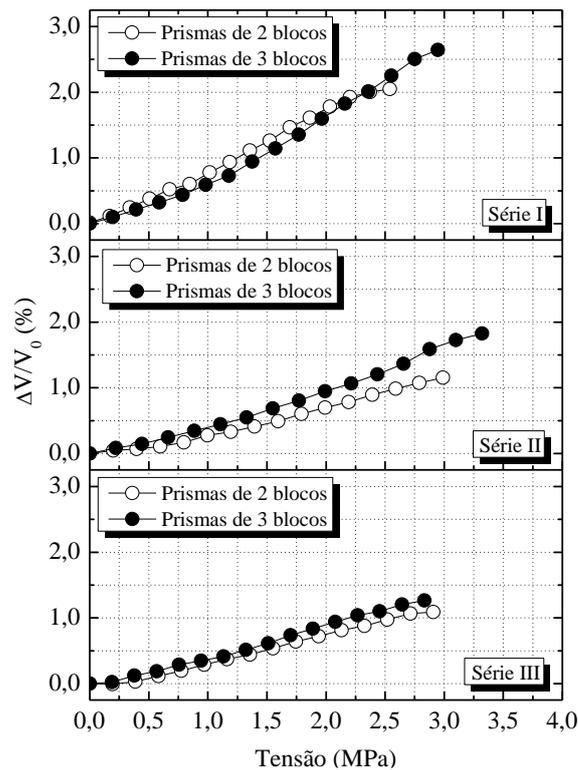
Fonte: Autoria própria.

Apesar do comportamento semelhante, notou-se que a variação relativa de velocidade nos prismas de 3 blocos foi levemente superior a variação obtida nos prismas de 2 blocos. Para os elementos da série I, as variações máximas foram de aproximadamente 3,40% para os prismas de 3 blocos e 3,01% para os prismas de 2 blocos, enquanto que para a série II os mesmos variaram no máximo 1,35% nos prismas de 2 blocos e 1,98% naqueles elementos compostos por 3 blocos. A mesma tendência foi observada nos prismas da série III.

Para ambas as séries de resistência avaliadas quanto às ondas V_{11} , um ponto positivo notado foi a baixa variação de resultados ao se analisar as curvas acustoelásticas de uma mesma série, exceto para os resultados obtidos nos prismas 1 e 2 da série I de prismas de 2 blocos, que por sua vez apresentaram resultados mais protuberantes em relação aos demais. Além disso, as curvas apresentaram comportamento predominantemente linear e com boa sensibilidade para identificação do efeito acustoelástico. Dessa forma, na grande maioria dos prismas avaliados não foi possível observar a presença da não linearidade inicial, exceto na curva acustoelástica dos prismas 2 das séries I e II, o que ratifica uma maior sensibilidade para ondas aplicadas na mesma direção do carregamento.

Neste contexto, embora os prismas de 3 blocos tenham apresentado uma maior variação relativa de velocidade, as curvas acustoelásticas médias destes dois elementos não apresentaram diferenças significativas, conforme indicado na Figura 5.22. Dessa forma, a maior variação relativa observada nos prismas de 3 blocos pode estar ligada apenas ao fato de que estes estavam submetidos a um maior nível de tensão aplicado, entretanto, as divergências nos coeficientes acustoelásticos são pequenas.

Figura 5.22 – Comparação entre prismas de 2 e 3 blocos para ondas V_{11}



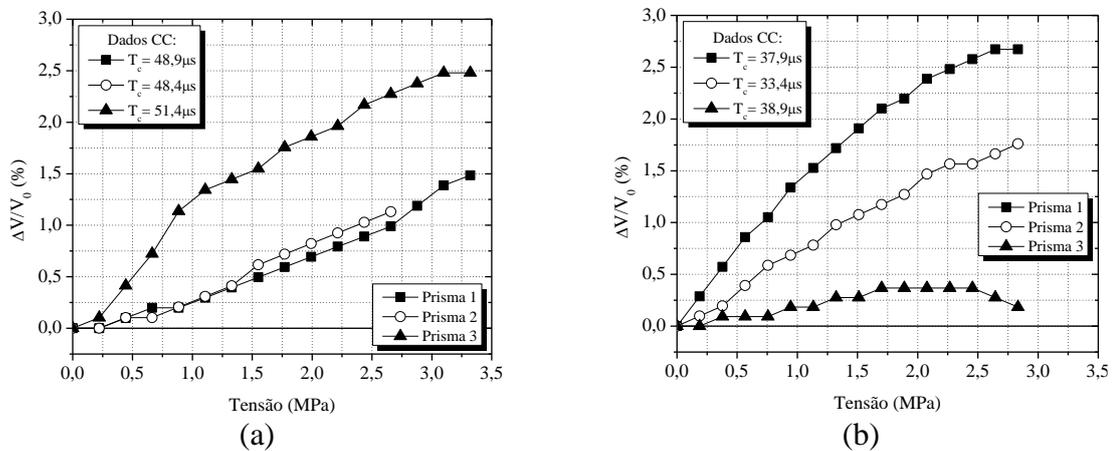
Fonte: Autoria própria.

A baixa variação de resultados entre as curvas acustoelásticas referentes as ondas V_{11} não foi verificada entre todas as séries de prismas analisadas. Para as ondas V_{22} , cuja as medições também foram realizadas através de medidas indiretas ao longo do comprimento dos blocos, as séries II e III apresentaram uma alta variabilidade entre as curvas acustoelásticas dos três prismas de uma mesma série, como ilustra a Figura 5.23.

Nas curvas acustoelásticas apresentadas na Figura 5.23, além da grande variabilidade de resultados dentro de uma mesma série, observa-se que para níveis elevados de tensão também ocorreu uma redução na variação relativa da velocidade, efeito que é traduzido nas curvas acustoelásticas pela existência de um patamar ou uma redução em seus trechos finais. Diante disso, acredita-se que tal comportamento esteja relacionado à presença de fissuras e danos existentes no material, tendo em vista que a diminuição da variação relativa de

velocidade naquele trecho corresponde a um nível de tensão próximo dos 30% aplicados, conforme também comenta Bompan (2021).

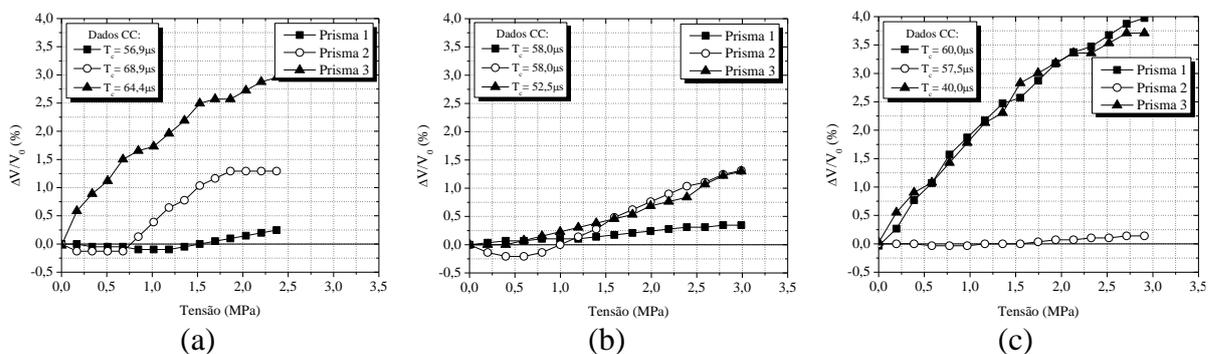
Figura 5.23 – Variação relativa da VPU para a onda V_{22} nas séries (a) II e (b) III dos prismas de 3 blocos



Fonte: Autoria própria.

Para as ondas V_{33} obtidas a partir das medidas diretas realizadas ao longo da largura dos blocos, observou-se um comportamento com muitas divergências entre os prismas analisados. De acordo com a Figura 5.24 que representa as curvas acustoelásticas das ondas V_{33} obtidas nos prismas de 2 blocos, notou-se uma grande variabilidade nos resultados. Diferentemente dos resultados apresentados nos blocos cerâmicos isolados que apontaram a existência de um trecho inicial não linear relacionado à danificação nos corpos de prova, este comportamento não ficou completamente caracterizado nos prismas de 2 blocos, que também apresentou curvas acustoelásticas com características completamente lineares para ondas que notadamente apresentaram baixa sensibilidade ao efeito nos blocos isolados, como no prisma 1 da série I e nos prismas 1 e 3 da série III. Além disso, nos prismas que apresentaram curvas acustoelásticas com comportamento não linear inicial, este foi relativamente discreto.

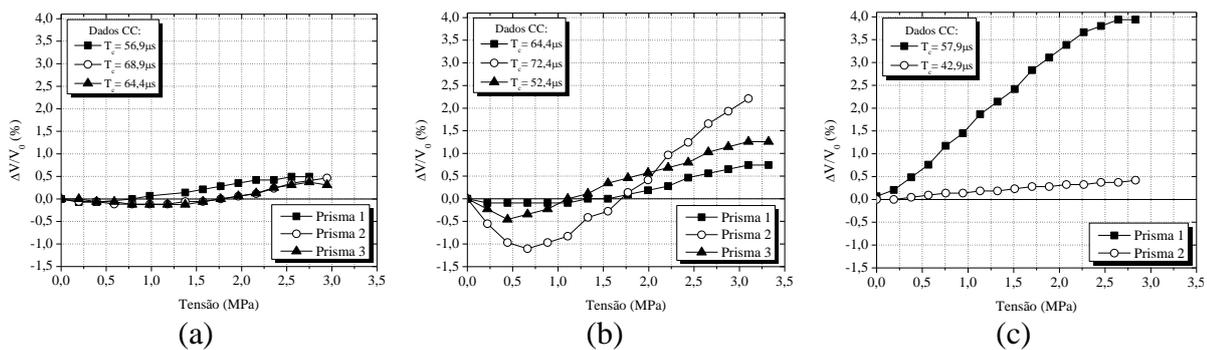
Figura 5.24 – Variação relativa da VPU para a onda V_{33} nas séries (a) I, (b) II e (c) III nos prismas de 2 blocos



Fonte: Autoria própria.

Para os prismas de 3 blocos, cujas curvas acustoelásticas estão indicadas na Figura 5.25, foi possível perceber uma maior sensibilidade à não linearidade inicial no comportamento acustoelástico. Uma vez que a aplicação de ciclos de carga e descarga favorecem a acomodação das deformações nas juntas de argamassa, há uma tendência de que a danificação nos prismas de 3 blocos seja superior à danificação nos prismas de 2 blocos, tendo em vista a presença de uma maior quantidade de juntas. Nos casos em que a não linearidade inicial foi observada, a variação relativa de velocidade permaneceu negativa até a aplicação de aproximadamente 18,1% do carregamento. A presença da não linearidade inicial nas curvas, bem como a presença de variações relativas de velocidade mais discretas indicam para uma baixa sensibilidade destas ondas para avaliação do efeito acustoelástico, como já havia sido observado para os blocos cerâmicos isolados.

Figura 5.25 – Variação relativa da VPU para a onda V_{33} nas séries (a) I, (b) II e (c) III nos prismas de 3 blocos

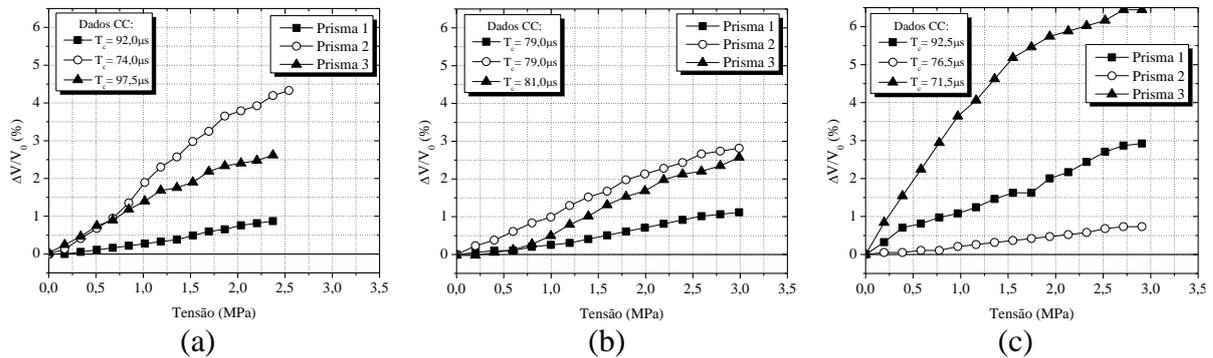


Fonte: Autoria própria.

No sentido contrário daquilo que foi observado para as medidas diretas V_{33} , as ondas V_{31} polarizadas na direção de aplicação do carregamento foram aquelas que apresentaram as maiores variações relativas de velocidade, como observado na Figura 5.26. Para estas ondas, a variação relativa máxima da velocidade atingiu valores de até 6,4% nos prismas de 2 blocos e 5,68% nos prismas de 3 blocos, ocasionando em uma alta variação relativa das velocidades. Apesar da variação, também foi possível observar uma variação considerável nas curvas acustoelásticas de uma mesma série, dificultando uma padronização do comportamento das curvas para uma melhor compreensão do fenômeno.

Diante do comportamento das curvas acustoelásticas, os coeficientes acustoelásticos para todas as ondas pôde ser obtido através de uma regressão linear, conforme a metodologia apresentada pela Figura 5.17. A Tabela 5.5 indica os coeficientes acustoelásticos individualmente para todos os prismas de 2 blocos, enquanto a Tabela 5.6 indica tais coeficientes para os prismas de 3 blocos.

Figura 5.26 – Variação relativa da VPU para a onda V_{31} nas séries (a) I, (b) II e (c) III nos prismas de 2 blocos



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.5 – Coeficientes acustoelásticos individuais para cada prisma de 2 blocos

Série	Prisma	A_{11}	A_{22}	A_{33}	A_{31}
Série I	1	1,39 (0,968)	0,29 (0,984)	0,27 (0,988)	0,39 (0,982)
	2	1,05 (0,983)	1,24 (0,956)	1,21 (0,985)	1,88 (0,986)
	3	0,16 (0,967)	0,28 (0,964)	1,16 (0,948)	1,12 (0,982)
Série II	1	0,48 (0,973)	0,36 (0,976)	0,12 (0,977)	0,40 (0,982)
	2	0,53 (0,987)	0,34 (0,985)	0,68 (0,993)	0,99 (0,992)
	3	0,33 (0,974)	0,44 (0,957)	0,45 (0,960)	0,97 (0,982)
Série III	1	0,27 (0,973)	0,24 (0,989)	1,38 (0,972)	0,97 (0,988)
	2	0,65 (0,984)	0,37 (0,959)	0,09 (0,967)	0,27 (0,987)
	3	0,40 (0,989)	0,06 (0,952)	1,29 (0,958)	2,20 (0,925)

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.6 – Coeficientes acustoelásticos individuais para cada prisma de 3 blocos

Série	Prisma	A_{11}	A_{22}	A_{33}	A_{31}
Série I	1	0,63 (0,961)	0,56 (0,978)	0,26 (0,985)	0,54 (0,980)
	2	0,91 (0,990)	0,28 (0,919)	0,35 (0,963)	0,34 (0,942)
	3	1,24 (0,983)	0,49 (0,974)	0,33 (0,948)	1,92 (0,970)
Série II	1	0,38 (0,994)	0,45 (0,973)	0,42 (0,976)	0,73 (0,984)
	2	0,60 (0,980)	0,46 (0,977)	1,46 (0,988)	1,72 (0,987)
	3	0,72 (0,979)	0,77 (0,952)	0,64 (0,991)	1,33 (0,960)
Série III	1	0,58 (0,992)	0,96 (0,964)	1,53 (0,986)	2,21 (0,976)
	2	0,43 (0,985)	0,64 (0,987)	0,15 (0,986)	0,16 (0,979)
	3	0,41 (0,998)	0,17 (0,935)	-	0,14 (0,968)

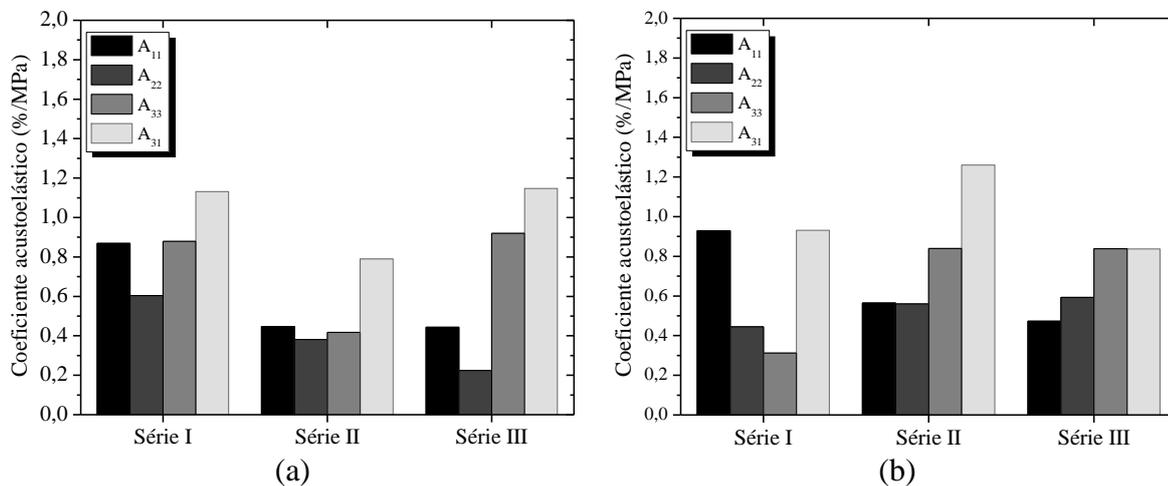
Fonte: Autoria própria.

Mediante avaliação dos coeficientes acustoelásticos, destaca-se os bons coeficientes de determinação obtidos para a análise isolada de cada corpo de prova. No entanto, de maneira semelhante ao que foi observado nos blocos, houve uma grande variabilidade entre diferentes

corpos de prova de uma mesma série. Nos prismas de 2 blocos, os coeficientes de variação flutuaram entre 14,4% e 91,5%, enquanto nos prismas de 3 blocos estes coeficientes variaram de 14% a 142%. Estes elevados coeficientes de variação para corpos de prova de uma mesma série manifestam a pequena ordem de grandeza do efeito acustoelástico, bem como expressa os efeitos da própria variabilidade da alvenaria utilizada.

A partir da média destes elementos isolados, a Figura 5.27 apresenta os coeficientes acustoelásticos médios para cada série de prismas de 2 e 3 blocos. Embora não seja possível observar um mesmo padrão no comportamento de todos os coeficientes, para ambas as geometrias de prismas avaliadas, as ondas V_{31} foram as que se mostraram mais sensíveis ao efeito acustoelástico, indo ao encontro dos resultados já obtidos para os blocos isolados.

Figura 5.27 – Coeficientes acustoelásticos médios para prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos



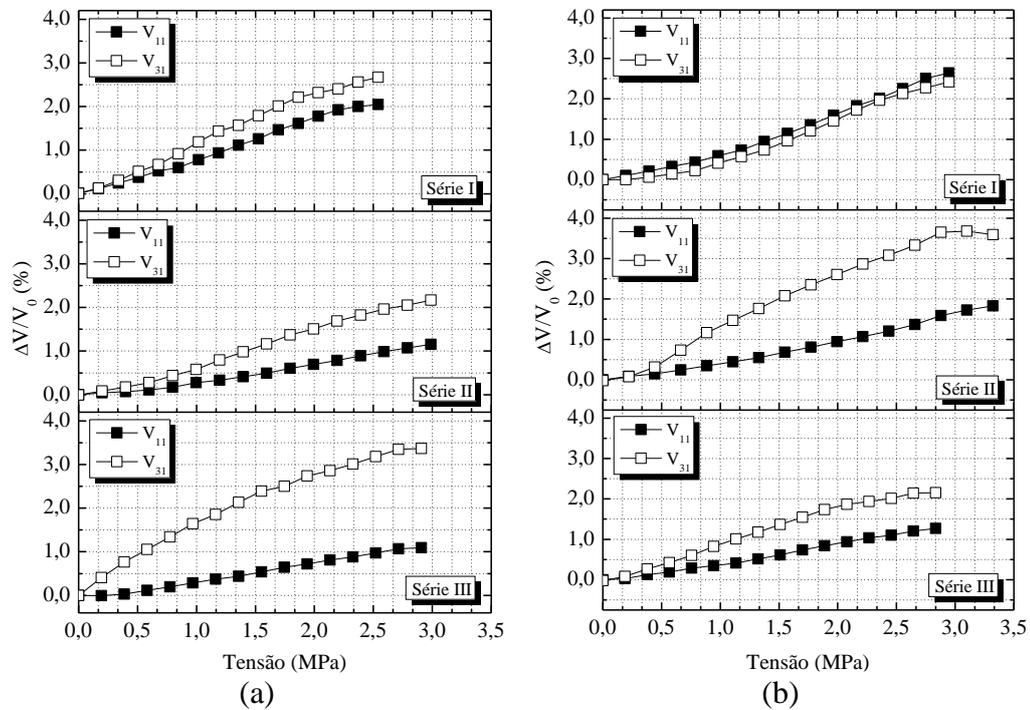
Fonte: Autoria própria.

Realizando uma comparação entre as curvas acustoelásticas médias obtidas para as ondas V_{11} e V_{31} , igualmente ao observado para os blocos cerâmicos, a onda V_{31} polarizada na mesma direção do carregamento mostrou-se mais sensível ao carregamento do a onda V_{11} que, embora também propagada na mesma direção do carregamento, trata-se de uma onda longitudinal. Para os prismas avaliados, confirma-se então esta tendência de maior sensibilidade do efeito nas ondas de cisalhamento, como pode ser visto na Figura 5.28.

Analisando as curvas acustoelásticas das ondas V_{22} e V_{33} propagadas na direção perpendicular à aplicação do carregamento, não foi possível observar uma mesma tendência para todas as séries, como as observadas para os blocos isolados. Entretanto, nos prismas de 3 blocos, as ondas V_{22} que foram propagadas através de medidas indiretas apontaram para uma maior sensibilidade ao efeito acustoelástico, apresentando uma maior resistência ao surgimento de variações relativas de velocidade negativas, como pode ser observado na Figura 5.29. Esta mesma tendência não foi vista para a série III dos prismas de 2 blocos. De

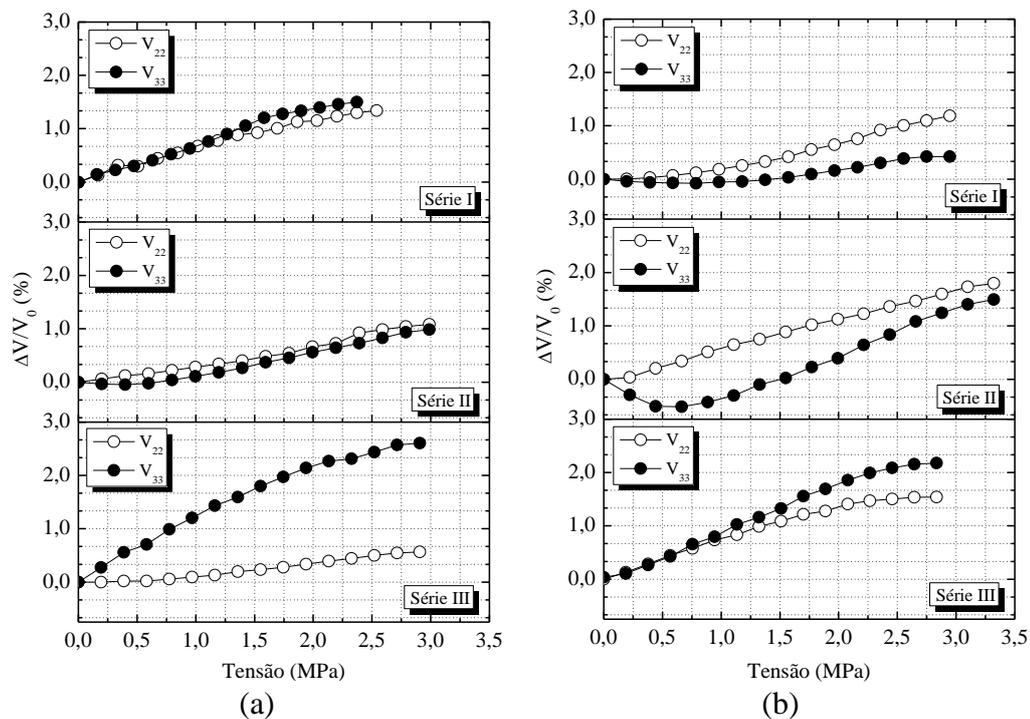
qualquer modo, uma vez que anteriormente notou-se uma similaridade entre as propriedades dinâmicas de ambas as direções, também foi possível notar uma aproximação razoável par ao comportamento acustoelástico destas duas ondas.

Figura 5.28 – Comparação entre as ondas V_{11} e V_{31} nos prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.29 – Comparação entre as ondas V_{22} e V_{33} nos prismas de (a) 2 blocos e (b) 3 blocos



Fonte: Autoria própria.

5.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, ensaios ultrassônicos foram realizados de maneira simultânea com a aplicação de cargas de compressão uniaxial em blocos e prismas para avaliação do efeito acustoelástico nestes elementos estruturais. Transdutores ultrassônicos com 250 kHz de frequência nominal foram posicionados ao longo das faces longitudinais e laterais de blocos cerâmicos e prismas de alvenaria, e medidas ultrassônicas diretas e indiretas foram realizadas ao passo em que diferentes níveis de carga e descarga foram aplicados.

O carregamento externo foi aplicado através de 11 ciclos de carga e descarga com nível máximo de tensão fixado em aproximadamente 30% da resistência média à compressão da amostra. As medidas ultrassônicas foram realizadas no último nível de descarga, onde pode-se observar um aumento da variação relativa da velocidade de pulso ultrassônico com a elevação do nível de tensão, caracterizando o efeito acustoelástico.

Este efeito pôde ser avaliado mediante as curvas acustoelásticas de quatro diferentes ondas ultrassônicas, por sua vez propagadas ao longo dos três eixos ortogonais dos blocos e polarizadas na direção de aplicação do carregamento aplicado.

De maneira geral, observou-se uma grande variabilidade nos resultados entre os diferentes corpos de prova de uma mesma série. No tocante às curvas acustoelásticas, as ondas V_{31} foram aquelas que apresentaram uma maior sensibilidade ao efeito e que apresentou, portanto, os maiores coeficientes acustoelásticos.

Ademais, as ondas de cisalhamento polarizadas na direção de aplicação do carregamento mostraram-se mais sensíveis ao efeito do que aquelas ondas longitudinais propagadas nesta mesma direção. Além disso, no que diz respeito às ondas propagadas na direção perpendicular à aplicação de carga, aquelas medidas através de medidas indiretas mostraram-se mais sensíveis ao efeito acustoelástico.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho realizou uma avaliação ultrassônica não destrutiva em elementos de alvenaria estrutural formados por blocos cerâmicos com vistas à caracterização de elementos de alvenaria livres de tensão e no estudo do efeito acustoelástico nos elementos submetidos a tensões uniaxiais de compressão. O trabalho foi dividido em três etapas principais que contemplaram a caracterização e a avaliação ultrassônica de blocos cerâmicos e prismas de alvenaria estrutural na ausência e presença de um estado de tensão uniaxial de compressão.

A seguir, apresentam-se as principais conclusões deste estudo, além de eventuais sugestões para pesquisas e tópicos importantes que não foram examinados neste trabalho, mas que poderão favorecer o entendimento e melhor compreensão do assunto por meio de avaliações realizadas posteriormente.

Na primeira etapa deste trabalho, realizou-se a caracterização e avaliação ultrassônica em blocos cerâmicos livres de tensão. Dessa forma, inicialmente as unidades cerâmicas, por sua vez divididas em três diferentes séries de resistência à compressão, foram analisadas quanto às suas propriedades geométricas, físicas e mecânicas através dos ensaios tradicionais e, posteriormente, submeteram-se à avaliação ultrassônica através de ensaios utilizando o método de velocidade de pulso ultrassônico, que possibilitou as seguintes conclusões:

- a) Conforme variação da série de resistência dos blocos utilizados, as unidades cerâmicas expressaram apenas pequenas diferenças quanto às suas propriedades geométricas e físicas, observando uma maior porosidade e absorção de água naquelas unidades de menor resistência à compressão;
- b) A avaliação ultrassônica através do mapeamento da VPU nas diferentes direções dos blocos apresentou uma variação considerável nestas velocidades, sendo possível observar valores aproximadamente 20% superiores nas velocidades obtidas ao longo da altura do corpo de prova, enquanto as velocidades medidas nas direções do comprimento e da largura não apresentaram diferenças significativas entre si;
- c) A partir da velocidade de pulso ultrassônico nos diferentes blocos cerâmicos,

observou-se uma grande influência do processo de produção na VPU destas unidades, uma vez que o processo de extrusão é responsável pela maior densificação das partículas na direção da altura e que, portanto, torna-a como sendo a direção que apresenta os maiores valores de velocidade longitudinal;

- d) Além da influência do processo de extrusão, observou-se que o processo de queima pode ter influência significativa na variação das propriedades ao longo de uma mesma direção, uma vez que os valores de VPU na região central dos septos internos dos blocos apresentou resultados até 15% inferiores às demais regiões do bloco avaliadas na mesma direção. Durante o processo de fabricação, esta região central é aquela que sofre a menor elevação de temperatura e, portanto, possui propriedades físico-mecânicas prejudicadas;
- e) Embora a velocidade de propagação longitudinal tenha sido maior quando analisada na direção da altura dos blocos cerâmicos, notou-se que a velocidade transversal apresentou os menores resultados para esta mesma direção, uma vez que tais ondas propagadas na direção da altura foram polarizadas na direção perpendicular. Neste mesmo sentido, as maiores velocidades transversais foram aquelas polarizadas na direção da altura;
- f) De posse de testes estatísticos comparando os resultados obtidos para a velocidade de pulso ultrassônico, as constantes elásticas e pela estimativa do coeficiente de Poisson dinâmico, identificou-se que os blocos cerâmicos apresentam comportamento transversalmente isotrópico, sendo as propriedades ao longo da altura estritamente diferentes daquelas obtidas ao longo do comprimento e da largura;
- g) A partir de todos os resultados obtidos, observou-se boas relações empíricas entre as propriedades físicas e a velocidade de pulso ultrassônico, uma vez que um maior índice de vazios ocasiona a redução da velocidade de pulso ultrassônico, ao passo que também reduz propriedades como a absorção de água e a porosidade;
- h) Relações empíricas também puderam ser obtidas entre as propriedades mecânicas obtidas através de métodos destrutivos tradicionais e a VPU, entretanto, com menores coeficientes de determinação, dado que as propriedades mecânicas dos blocos se diferenciam das propriedades do material cerâmico por conta da distribuição de tensões e deformações não uniforme ao longo das unidades.

Na segunda etapa do trabalho, realizaram-se os ensaios para caracterização e avaliação ultrassônica em prismas de alvenaria livres de tensão. Dessa forma, inicialmente os prismas e

as argamassas de assentamento tiveram as suas propriedades físico-mecânicas analisadas pelos testes laboratoriais tradicionais e em seguida foram avaliadas segundo a realização de ensaios não destrutivos ultrassônicos, propiciando as seguintes conclusões:

- a) As argamassas de assentamento utilizadas para construção dos prismas apresentaram alta resistência à compressão em relação ao bloco cerâmico e influenciaram de maneira razoável no comportamento e modo de ruptura dos prismas;
- b) A velocidade de pulso ultrassônico aferida nos prismas apresentou alta variabilidade nas diferentes regiões de um mesmo corpo de prova, indicando para uma considerável influência da interface bloco-junta na atenuação das ondas ultrassônicas;
- c) A influência da atenuação das ondas na região da interface bloco-junta foi ratificada à medida em que os prismas de 3 blocos apresentaram velocidades de propagação aproximadamente 30% inferiores em alguns casos em relação aos prismas de 2 blocos;
- d) Com base na velocidade teórica de propagação ultrassônica em prismas de alvenaria, observou-se através de uma estimativa teórica, que a atenuação das ondas foi maior nos prismas que apresentavam materiais constituintes mais resistentes, sendo responsável por até 46% de redução na VPU em alguns casos;
- e) A partir de relações da VPU com as características de deformabilidade dos prismas, observou-se que ambas as propriedades são diretamente proporcionais, uma vez que velocidades de pulso ultrassônico mais baixas foram notadas em prismas mais deformáveis, tendo em vista que as mesmas falhas nas juntas que provocam a atenuação das ondas, também ocasionam uma maior acomodação de deformações no elemento. No entanto, tal comportamento não ficou caracterizado nos prismas de 3 blocos;
- f) Uma vez que as propriedades mecânicas dos prismas apresentaram baixa relação com a sua velocidade de pulso ultrassônico, um modelo teórico foi proposto visando a obtenção da resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e do comportamento tensão x deformação dos prismas a partir da VPU, apresentando uma boa concordância entre os resultados experimentais médios de cada série e os resultados teóricos.

Na última etapa desta pesquisa, blocos e prismas de alvenaria estrutural submeteram-se a ensaios para obtenção da velocidade de pulso ultrassônico simultaneamente à aplicação de carregamento de compressão uniaxial para avaliação do efeito acustoelástico, possibilitando as seguintes conclusões:

- a) Embora o nível de carregamento aplicado nos elementos tenha permanecido no máximo em 30% da sua resistência última, houve concentrações de tensão na região de aplicação do carregamento que favoreceram o surgimento de fissuras na região central dos blocos e prismas;
- b) Em todas as quatro ondas analisadas, foi possível caracterizar o efeito acustoelástico através das curvas acustoelásticas e de seus respectivos coeficientes acustoelásticos;
- c) Quanto ao comportamento das curvas acustoelásticas, observou-se uma grande variabilidade nos resultados entre diferentes corpos de prova de uma mesma série, o que manifesta a pequena ordem de grandeza e sensibilidade para captação do efeito;
- d) A partir da análise das curvas acustoelásticas, notou-se que as ondas ultrassônicas polarizadas na mesma direção de aplicação do carregamento apresentaram maiores sensibilidades para presença do efeito acustoelástico;
- e) Além disso, as ondas propagadas na direção perpendicular à aplicação do carregamento foram aquelas que apresentam as menores variações relativas de velocidade, denotando em alguns casos a sua baixa sensibilidade ao efeito. Ademais, no que diz respeito à estas ondas, os sinais propagados através de medidas indiretas mostraram-se mais sensíveis ao efeito acustoelástico do que as ondas propagadas por meio de medidas diretas;
- f) Por conta da baixa sensibilidade ao efeito acustoelástico de algumas ondas, pôde-se observar a presença de um trecho inicial não linear nas curvas acustoelásticas que, acredita-se ter ligação com a danificação do material, uma vez que esta atua contrariamente ao efeito acustoelástico e provoca uma redução nas variações relativas de velocidade.

Por fim, espera-se que as discussões apresentadas neste trabalho possam auxiliar a compreensão de importantes tópicos ligados à avaliação ultrassônica dos elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, como a variação de suas propriedades ao longo das diferentes direções ortogonais, o comportamento transversalmente isotrópico das unidades cerâmicas vazadas e os fatores que influenciam na propagação das ondas ultrassônicas nos prismas de alvenaria. Ademais, as equações empíricas apresentadas neste trabalho podem ser utilizadas em blocos e prismas cerâmicos de alvenaria estrutural, contribuindo na previsão das propriedades físico-mecânicas desses elementos em situações em que os ensaios tradicionais para obtenção de tais propriedades podem ser considerados onerosos ou inviáveis.

No que diz respeito à avaliação ultrassônica destes mesmos elementos sob tensão, os resultados possibilitaram um entendimento a respeito do comportamento acustoelástico dos

mesmos, bem como apresentaram um esclarecimento sobre a sensibilidade de diferentes tipos de ondas e medidas empregadas na investigação. Além disso, apesar da quantidade limitada de corpos de prova utilizados, os coeficientes acustoelásticos aferidos irão contribuir com o estado da arte neste campo de pesquisa e poderão nortear pesquisas futuras voltadas para a avaliação *in situ* das estruturas de alvenaria.

Como sugestões para trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa, propõe-se:

- a) Realizar a avaliação ultrassônica nos blocos cerâmicos considerando a anisotropia dos mesmos, com o objetivo de obter todas as constantes elásticas e as propriedades dinâmicas do material;
- b) Analisar a caracterização de blocos e prismas de alvenaria estrutural livres de tensão por meio de medidas ultrassônicas indiretas, sendo estas as mais acessíveis *in situ*;
- c) Compreender a influência da danificação do material na não linearidade inicial observada nas curvas acustoelásticas das ondas menos sensíveis ao efeito acustoelástico;
- d) Analisar possíveis relações entre o comportamento mecânico (tensão x deformação) dos elementos de alvenaria durante os ensaios cíclicos de acustoelasticidade e a resposta da curva acustoelástica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGELIS, D. G.; MOMOKI, S.; CHAI, H. Surface wave dispersion in large concrete structures. **NDT&E International**, v. 42, n. 4, p. 304-307, 2009.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI-530-11: Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures**. Detroit, Michigan, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597-16: Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete**. West Conshohocken, PA, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1006 – 07: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Masonry Units**. Pennsylvania, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2845:05 Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock**. Pennsylvania, 2005.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**. Abendi, Ed. Jun./2018, 2018.

ANSON, M.; NEWMAN, K. The effect of mix proportions and method of testing on Poisson's ratio for mortars and concretes. **Magazine of Concrete Research**, v. 18, n. 56, p. 115–130, 1966.

ARAÚJO, E.; SOUSA, I.; PAZ, R.; COSTA, C. H.; MESQUITA, E. Physical and mechanical characterization of traditional Brazilian clay bricks from different centuries. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 5, n. 22, p. 1-12, 2020.

AROSIO, D.; MUNDA, S.; ZANZI, L.; PORTO, F.; MOSELE, F. Nondestructive quality control of reinforced masonry buildings. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 18, n. 1, p. 34-46, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136: Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança**

nas estruturas. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto Endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria, Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria, Parte 2: Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização dos ensaios.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16805: Ensaios não destrutivos – Ultrassom – Caracterização de painéis por velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-1: Alvenaria estrutural, Parte 1: Projeto.** Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-2: Alvenaria estrutural, Parte 2: Execução e controle.** Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-3: Alvenaria estrutural, Parte 3: Métodos de ensaios.** Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

- BARBOSA, C. S. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto, prismas e paredes e suas correlações com as propriedades mecânicas dos materiais constituintes**. 2008. 262p. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- BASTOS, P. K. X.; NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. Ensaio de retração em argamassas nos estados fresco e endurecido – Contribuição para a normalização brasileira. **1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção**, Lisboa, Portugal, 2005.
- BOMPAN, K. F. **Avaliação do efeito acustoelástico em elementos de concreto usando a propagação de ondas ultrassônicas pelos métodos de transmissão direta e indireta**. 2021. 258p. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.
- 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**, v. 162, p. 740–750, 2018.
- BOURRET, J.; TESSIER-DOYEN, N.; GUINEBRETIERE, R.; JOUSSIEN, E.; SMITH, D. S. Anisotropy of thermal conductivity and elastic properties of extruded clay-based materials: Evolution with thermal treatment. **Applied Clay Science**, v. 116-117, p. 150-157, 2015.
- BROZOVSKY, J.; ZACH, J. Non-destructive testing of solid brick compression strength in structures. **IV Conferencia Panamericana de END**, Buenos Aires, Argentina, 2007.
- BROZOVSKY, J. Ultrasonic pulse method-influence of internal compressive stress on results of testing calcium silicate bricks. **Key Engineering Materials**. v. 722, p.260–266, 2017.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **CP 111 – Structural recommendations for load-bearing walls**. Londres, Inglaterra. 1948.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5628 – Code of practice for masonry. Part 1: Structural use of unreinforced masonry**. Londres, Inglaterra. 1978.
- CABANÉ, A.; PELÀ, L.; ROCA, P. Anisotropy and compressive strength evaluation of solid fired clay bricks by testing small specimens. **Construction and Building Materials**, v. 344, p. 1-12, 2022.
- CAMASSA, D.; CASTELLANO, A.; FRADDOSIO, A.; PICCIONI, M. D. Improvement of the ultrasonic tomography for applications to historical masonry constructions. *In*: AGUILAR, R. **Structural Analysis of Historical Constructions**. RILEM Bookseries, 2018. p. 447-455.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA S304.1 – Design of masonry structures**. Ontario, 2004.
- CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARASEK, H. Argamassas. *In*: SAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: IBRACON, 2017. p 922-969.

CASALI, J. M. **Estudo da interação entre a argamassa de assentamento e o bloco de concreto para alvenaria estrutural: transporte de água e aderência**. 2008. 324p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CVF INCORPORADORA. Alvenaria estrutural: segurança, qualidade e rapidez na execução. **CVF Incorporadora**, 2023. Disponível em www.cvfincorporadora.com.br. Acesso em 08/03/2023.

CONCU, G.; NICOLO, B. D.; VALDES, M. Prediction of buildings limestone physical and mechanical properties by means of ultrasonic P-wave velocity. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p. 1-9, 2014.

CORRÊA, M. R. S. **Alvenaria estrutural: Interação de paredes e eficiência do grauteamento sob solicitações combinadas**. Projeto de pesquisa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2012.

CORRÊA, M. R. S. Masonry engineering in Brazil: past development, current overview, future improvements. **15th International Brick and Block Masonry Conference**, Florianópolis, Brasil, 2012.

DILEK, U. Ultrasonic Pulse Velocity in Nondestructive Evaluation of Low Quality and Damaged Concrete and Masonry Construction. **Journal of Performance of Constructed Facilities**. v. 21, p. 334-344, 2007.

DIZHUR, D.; LUMANTARNA, R.; BIGGS, D. T.; INGHAM, J. M. In-situ assessment of the physical and mechanical properties of vintage solid clay bricks. **Materials and Structures**, v. 50, n. 63, p. 2-14, 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6: EN 1996-1.1: Design of masonry structures, Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures**. Brussels, 2005.

FARINHA, C. B.; BRITO, J.; VEIGA, R. Assessment of glass fibre reinforced polymer waste reuse as filler in mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1579-1594, 2019.

FERNANDES NETO, J. A. D. **Estudo experimental do comportamento de elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos em situação de incêndio**. 2020. 179p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

GALLEGOS, H. Adhesión entre el mortero y las unidades de albañilería. **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, Goiânia, Brasil, 1995.

GARZÓN-ROCA, J.; MARCO, C. O.; ADAM, J. M. Compressive strength of masonry made of clay bricks and cement mortar: estimation based on neural networks and fuzzy logic.

Engineering Structures, v. 48, p. 21–27, 2013.

GONDIM, R. M. R. **Investigação do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria estrutural formados por blocos de concreto**. 2022. 184p. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

GRUBBS, F. E. Procedures for detecting outlying observations in samples. **Technometrics**, v. 11, n. 1. 1969.

HAACH, V. G.; VASCONCELOS, G.; LOURENÇO, P. B. Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2980–2987, 2011.

HAACH, V. G. **Aplicação do ultrassom como ensaio não destrutivo para a avaliação de elementos de concreto**. 2017. 140p. Texto sistematizado (Livre docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

HAACH, V. G.; CARRAZEDO, R.; OLIVEIRA, L. M. F. Resonant acoustic evaluation of mechanical properties of masonry mortars. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 494–505, 2017.

HENDRY, A. W.; MALEK, M. H. Characteristic compressive strength of brickwork walls from collected test results. **Masonry International**, v. 7, p. 15–24, 1986.

HENDRY, A. W. Engineered design of masonry buildings: fifty years development in Europe. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 4, n. 3, p. 291–300, 2002.

HENDRY, A. W.; SINHA, B. P.; DAVIES, S. S. **Design of masonry structures**. London, E & FN Spon, 2004. 279p.

HUGHES, D. S; KELLY, J. L. Second-order elastic deformation of solids. **Physical Review**, v. 92, p. 1145-1149, 1953.

IZQUIERDO, O. S. **Estudo da interface bloco/graute em elementos de alvenaria estrutural**. 2015. 322p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2015.

JASIŃSKI, R.; DROBIEC, L.; MAZUR, W. Validation of selected non-destructive methods for determining the compressive strength of masonry units made of autoclaved aerated concrete. **Materials**, v. 12, n. 389, 2019.

JASIŃSKI, R. Identification of stress states in compressed masonry walls using a non-destructive technique (NDT). **Materials**, v. 13, n. 2852, p. 1-25, 2020.

JASIŃSKI, R.; STEBEL, K.; KIELAN, P. Use of the AE effect to determine the stresses state in AAC masonry walls under compression. **Materials**, v. 14, n. 13, 2021.

KASINIKOTA, P.; TRIPURA, D. D. Prediction the effect of crushed brick particle size on anisotropy, physical and mechanical properties of compressed stabilized earth blocks using ultrasonic pulse velocity. **Materials and Structures**, v. 54, n. 112, p. 1-20, 2021.

KASINIKOTA, P.; TRIPURA, D. D. Prediction of physical-mechanical properties of hollow interlocking compressed unstabilized and stabilized earth blocks at different moisture conditions using ultrasonic pulse velocity. **Journal of Building Engineering**, v. 48, p. 2-28, 2022.

KAUSHIK, H. B.; RAI, D. C.; JAIN, S. K. Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 9, p. 728–739, 2007.

KHODAVERDIAN, A; SHOMALI, B. The actions of axial loads on masonries – Ultrasonic verifications and statistical analysis of obtained data. **IABSE Symposium: Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Areas**, Veneza, Itália, 2010.

KORAH, L. V.; NIGAY, P. M.; CUTARD, T.; NZIHOU, A.; THOMAS, S. The impact of the particle shape of organic additives on the anisotropy of a clay ceramic and its thermal and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 654-660, 2016.

KOROTH, S. R.; FAZIO, P.; FELDMAN, D. Evaluation of clay brick durability using ultrasonic pulse velocity. **Journal of Architectural Engineering**, v. 4, n. 4, p. 142-147, 1998.

LILLAMAND, I.; CHAIX, J. F.; PLOIX, M. A.; GARNIER, V. Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading. **NDT&E International**, v. 43, n. 8, p. 655–660, 2010.

LÜBECK, A. **Comportamento mecânico e influência da argamassa no modo de ruptura da alvenaria estrutural**. 2016. 284p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

LUMANTARNA, R.; BIGGS, D. T.; INGHAM, J. M. Uniaxial compressive strength and stiffness of field-extracted and laboratory-constructed masonry prisms. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 4, p. 567–575, 2014.

LOURENÇO, P. B.; VASCONCELOS, G.; MEDEIROS, P.; GOUVEIA, J. Vertically perforated clay brick masonry for loadbearing and non-loadbearing masonry walls. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2317-2330, 2010.

MCCANN, D. M.; FORDE, M. C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. **NDT&E International**, v. 34, p. 71-84, 2001.

MAILLARD, P.; AUBERT, J. E. Effects of the anisotropy of extruded earth bricks on their hygrothermal properties. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 56-61, 2014.

MAKOOND, N; PELÀ, L; MOLINS, C. Dynamic elastic properties of brick masonry constituents. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 756-770, 2019.

MAKOOND, N; CABANÉ, A; PELÀ, L; MOLINS, C. Relationship between the static and dynamic elastic modulus of brick masonry constituents. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 1-13, 2020.

MALHOTRA, V. M; CARINO, N. J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2 ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004.

MANNING, E; RAMOS, L. F; FERNANDES, F. M. Direct sonic and ultrasonic wave velocity in masonry under compressive stress. **9^a International Masonry Conference**, Guimarães, Portugal, 2014.

MARQUES, R.; LOURENÇO, P. B. Structural behaviour and design rules of confined masonry walls: Review and proposals. **Construction and Building Materials**, v. 217, p. 137–155, 2019.

MARVILA, M. T.; AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; ZANELATO, E. B.; AZEREDO, N. G.; SIMONASSI, N. T.; MONTEIRO, S. N. Correlation between the properties of structural clay blocks obtained by destructive tests and ultrasonic pulse tests. **Journal of Building Engineering**, v. 26. 2019.

MATA, R. C., **Análise experimental e numérica do comportamento de junta em painéis de contraventamento de alvenaria estrutural**. 2011. 184p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2011.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, properties and materials**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

MESQUITA, E; MARTINI, R; ALVES, A; ANTUNES, P; VARUM, H. Non-destructive characterization of ancient clay brick walls by indirect ultrasonic measurements. **Journal of Building Engineering**, v. 19, p. 172-180, 2018.

MIRANDA, L. A. **Estudo do efeito do não preenchimento das juntas verticais e eficiência do graute na resistência da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos**. 2012. 206p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MIRANDA, L.; CANTINI, L.; GUEDES, J.; BINDA, L.; COSTA, A. Applications of sonic tests to masonry elements: influence of joints on the propagation velocity of elastic waves. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 6, p. 667–682, 2013.

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto**. 1998. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MOHAMAD, G.; FONSECA, F. S.; VERMELTFOORT, A. T.; MARTENS, D. R. W.; LOURENÇO, P. B. Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry constructed with mortars of different strengths. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 489–496, 2017.

MONTEAGUDO, S. M.; CASATI, M. J.; GALVÉZ, J. C. Influence of the bed joint thickness on the bearing capacity of the brick masonry under compression loading. **Revista de La Construcción**, v. 14, n. 1, pp. 9-15, 2015.

MURNAGHAN, F. D. Finite deformations of an elastic solid. **American Journal of Mathematics**, v. 59, p. 235-260, 1937.

NALON, G. H.; ALVES, M. A.; PEDROTI, L. G.; et al. Compressive strength, dynamic, and static modulus of cement-lime laying mortars obtained from samples of various geometries. **Journal of Building Engineering**, v. 44, 2021.

NOGUEIRA, C. L. Ultrasonic evaluation of acoustoelastic parameters in aluminum **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 10, 2017.

NOOR-E-KHUDA, S.; ALBERMANI, F. Mechanical properties of clay masonry units: Destructive and ultrasonic testing. **Construction and Building Materials**, v. 219, p. 111-120, 2019.

OLIVEIRA, L. M. F. **Estudo teórico e experimental do comportamento das interfaces verticais de paredes interconectadas de alvenaria estrutural**. 2014. 272p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

OLIVEIRA, R; BRITO, J; VEIGA, R. Reduction of the cement content in rendering mortars with fine glass aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p. 75-88, 2015.

OLIVITO, R. S. Stress analysis in masonry walls by ultrasonic measurements. **Applied Stress Analysis**, p. 486-495, 1990.

ORENDAY-TAPIA, E. E.; PACHECO-MARTÍNEZ, J.; PADILLA-CENICEROS, R.; LÓPEZ-DONCEL, R. A. In situ and nondestructive characterization of mechanical properties of heritage stone masonry. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 7, 2018.

ORTEGA, L. P. C; LAMY, C. A; BITTENCOURT, M. S. C; PAYÃO FILHO, J. C; GONÇALVES FILHO, O. J. A. **Introdução à avaliação de tensões por ultrassom**. 1 ed. Rio de Janeiro: Virtual Científica, 2011.

ÖZKAN, I.; YAYLA, Z. Evaluation of correlation between physical properties and ultrasonic pulse velocity of fired clay samples. **Ultrasonics**, v. 66, p. 4-10, 2016.

PARSEKIAN, G. A.; FONSECA, F. S.; PINHEIRO, G. L.; CAMACHO, J. S. Properties of mortar using cubes, prism halves, and cylinder specimens. **ACI Materials Journal**, v. 111, n. 4, p. 443–454, 2014.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. São Carlos, Edufscar, 2014. 625p.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. São Paulo, Pini, 2003. 174p.

RAMESH, M; AZENHA, M; LOURENÇO, P. B. Mechanical properties of lime-cement masonry mortars in their early ages. **Materials and Structures**, v. 52, n. 13, p. 1-14, 2019.

- RESENDE, R. M. L. G. **Avaliação dos efeitos da danificação e da acustoelasticidade sobre a velocidade de pulso ultrassônico em corpos de prova de concreto submetidos a compressão uniaxial**. 2018. 133p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- SAJID, S. H.; ALI, S.; M.; CARINO, N. J.; SAEED, S.; SAJID, H. U.; CHOUINARD, L. Strength estimation of concrete masonry units using stress-wave methods. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 518-528, 2018.
- SANCHEZ, E. Altura efetiva da parede de alvenaria estrutural. **Revista da Anicer**, 2021. Disponível em www.revista.anicer.com.br. Acesso em 08/03/2023.
- SANTOS, A. M.; CABRAL, L. M. C.; MONTEIRO, E. B.; HELENE, P. R. L. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico para diferentes dosagens de concreto. **55º Congresso Brasileiro do Concreto**, Gramado, Brasil, 2013.
- SCHIAVON, K. F. B. **Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de concreto**. 2015. 130p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- SCHULLER, M.; BERRA, M.; ATKINSON, R.; BINDA, L. Acoustic tomography for evaluation of unreinforced masonry. **Construction and Building Materials**, v. 11, n. 3, p. 199–204, 1997.
- SCHULLER, M. P. Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 5, n. 4, p. 239–251, 2003.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.
- SKLODOWSKI, M. Application of ultrasonic edge probes to on-site testing of mechanical properties of historical construction materials. **SMW08 In Situ Monitoring of Monumental Surfaces**, Florence, Itália, 2008.
- SNIEDER, R.; GRÊT, A.; DOUMA, H.; SCALES, J. Coda Wave Interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity. **Science**, v. 295, p. 2253-2255, 2002.
- SOMBRA, T. N. **Aplicação do ensaio de ressonância acústica na caracterização mecânica de unidades de alvenaria estrutural**. 2020. 159p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.
- SOMBRA, T. N.; HAACH, V. G. Application of Acoustic Tests for the Mechanical Characterization of Hollow Masonry Units. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n. 6, 2022.
- STEPINAC, M.; KISICEK, T.; RENIĆ, T.; HAFNER, I.; BEDON, C. Methods for the assessment of critical properties in existing masonry structures under seismic loads-the ARES project. **Applied Sciences**, 1. mar. 2020.

VASANELLI, E; CALIA, A; LUPRANO, V; MICELLI, F. Ultrasonic pulse velocity tests for non-destructive investigations of historical masonries: An experimental study of the effect of frequency and applied load on the response of a limestone. **Materials and Structures**, v. 50, n. 38, p. 1-11, 2017.

VASANELLI, EMILIA; COLANGIULI, D.; CALIA, A.; SBARTAÏ, Z. M.; BREYSSE, D. Combining non-invasive techniques for reliable prediction of soft stone strength in historic masonries. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 744–754, 2017.

VASCONCELOS, G.; LOURENÇO, P. B.; ALVES, C. A. S.; PAMPLONA, J. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. **Ultrasonics**, v. 48, p. 453-466, 2008.

ZIELIŃSKA, M.; RUCKA, M. Non-destructive assessment of masonry pillars using ultrasonic tomography. **Materials**, v. 11, n. 2543, 2018.

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DO TESTE ESTATÍSTICO DE GRUBBS

Este teste foi desenvolvido por Grubbs (1969) com o objetivo de verificar a presença de valores discrepantes em amostras em que os dados seguem um padrão de distribuição normal. A presença desses valores pode ser justificada devido às manifestações de variabilidade aleatória dos dados ou possíveis erros durante a aquisição e tratamento dos mesmos.

De modo geral, a verificação quanto à existência de valores espúrios é realizada mediante o cálculo estatístico, cujos resultados são comparados com valores críticos baseados na teoria de amostras aleatórias. Ao final da verificação, identificando-se um valor considerado discrepante, este é retirado da amostra, calcula-se uma nova média e desvio-padrão para o espaço amostral atualizado, e realiza-se um novo teste até que todos os valores sejam considerados aceitáveis.

No teste de Grubbs, dado um conjunto de dados X_i com $i = 1, 2, 3, \dots$, utiliza-se o seguinte teste estatístico:

$$Z = \frac{|x_i - \delta|}{s} \quad \text{Equação A.1}$$

Onde:

x_i é uma amostra do conjunto X_i ;

δ é a média amostral do conjunto X_i ;

s é o desvio-padrão do conjunto X_i .

Se Z for maior que Z_c (valor crítico tabelado), para um nível de significância α , adotado neste trabalho igual a 5%, considera-se aceita a hipótese de que a amostra é discrepante e a mesma é retirada do conjunto de dados. A Tabela A.1 apresenta os valores de Z_c para um nível de significância de 5% conforme o tamanho do conjunto.

Tabela A.1 – Valores críticos para o teste de Grubbs

n	Z_c	n	Z_c	n	Z_c
3	1,153	9	2,110	15	2,409
4	1,462	10	2,176	16	2,443
5	1,671	11	2,234	17	2,475
6	1,822	12	2,285	18	2,504
7	1,938	13	2,331	19	2,531
8	2,032	14	2,372	20	2,557

Fonte: Adaptada de Grubbs (1969).

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS TESTES ESTATÍSTICOS F E T

Com o objetivo de realizar uma comparação entre os diferentes resultados dos ensaios experimentais, realizaram-se os testes estatísticos F e T para a significância estatística entre os resultados distintos.

Neste trabalho, para análise da homogeneidade da variância entre duas amostras utilizou-se o teste estatístico F, com o objetivo de verificar se a variância entre as duas amostras divergia estatisticamente, e para verificar a divergência entre as médias das amostras foi realizado o teste T ou “t de *student*”. Ambos os testes foram realizados de maneira automatizada com auxílio do Excel adotando-se um nível de significância igual a 5%, ou seja, $\alpha = 0,05$.

Inicialmente, realizou-se o teste F para verificar a variância entre as duas amostras. De modo geral, o resultado obtido no teste F representa um valor adquirido da distribuição F de probabilidades, sendo este o valor observado para as respectivas amostras (F_o). A avaliação quanto à divergência entre as variâncias é realizada comparando o valor observado (F_o) com o valor crítico (F_c), correspondente ao nível de significância adotado (α).

Assim, Se $F_o > \alpha$ considera-se aceita a hipótese de que não há divergência significativa entre a variância das amostras.

Posteriormente, realizou-se o teste T para verificar se havia divergências significativas entre as médias de duas amostras. De maneira similar ao realizado anteriormente, o resultado obtido do teste T é denominado *p-value*, que por sua vez é comparado com o nível de significância α para verificação da hipótese de igualdade entre as médias das amostras.

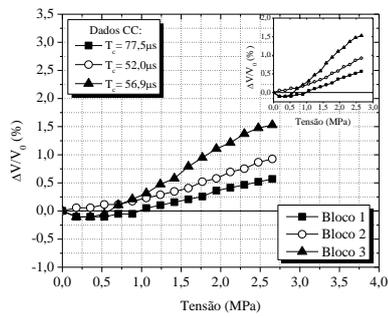
Assim, se $p\text{-value} < \alpha$ considera-se aceita a hipótese de que há divergências significativas entre as médias das amostras, ou seja, quanto menor o *p-value*, maior a diferença estatística entre as médias das amostras.

APÊNDICE C – CURVAS ACUSTOELÁSTICAS

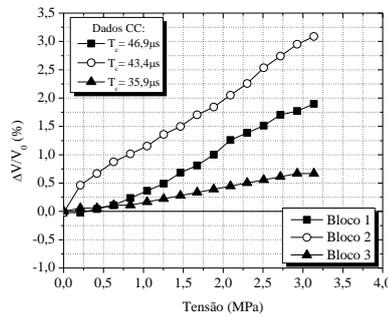
Neste apêndice serão apresentadas as curvas acustoelásticas obtidas para os blocos cerâmicos e os prismas de alvenaria compostos por 2 e 3 blocos. As curvas serão divididas por tipo de elemento analisado, série e por onda avaliada.

C.1 – Curvas acustoelásticas dos blocos cerâmicos

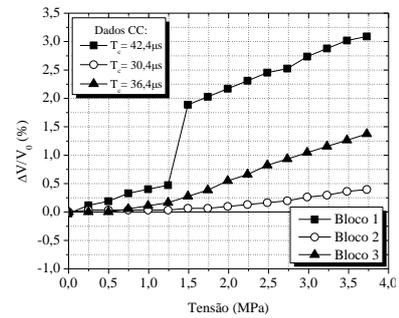
C.1.1 - Ondas V₁₁



Série I

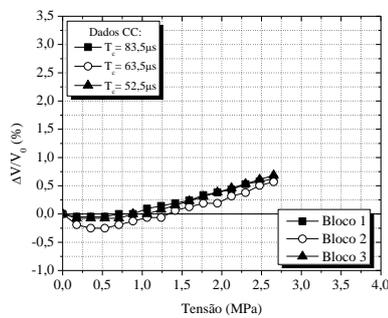


Série II

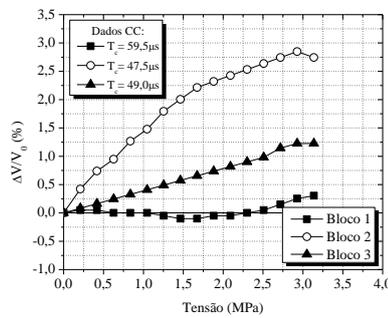


Série III

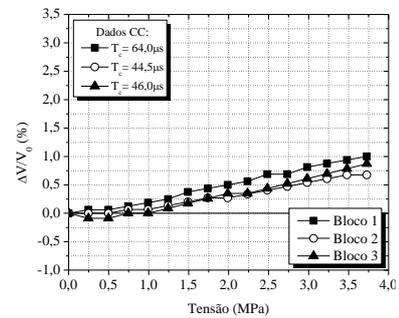
C.1.2 - Ondas V₂₂



Série I

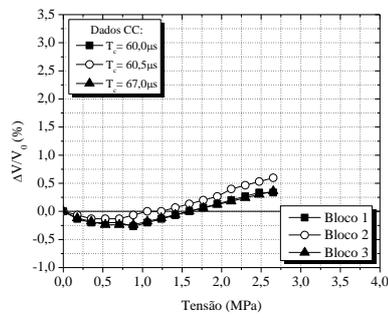


Série II

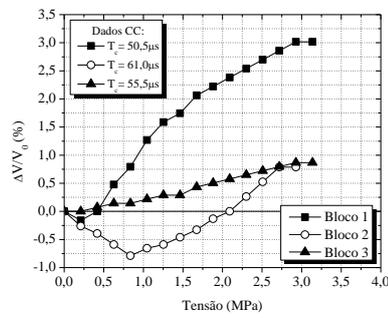


Série III

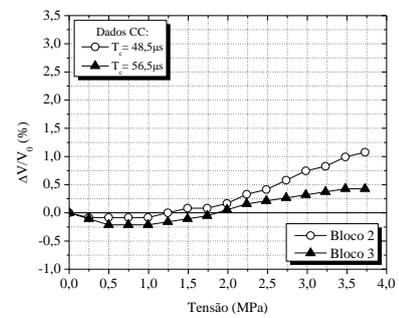
C.1.3 - Ondas V₃₃



Série I

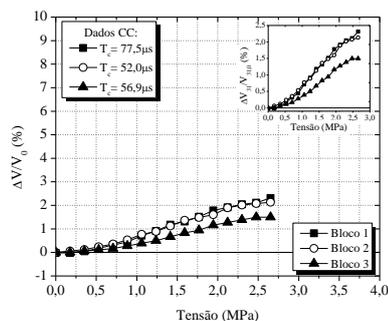


Série II

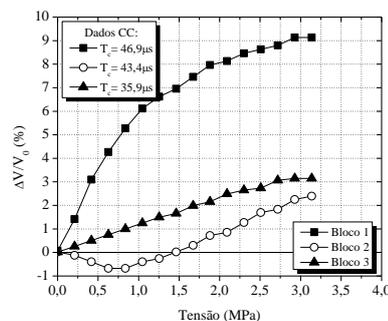


Série III

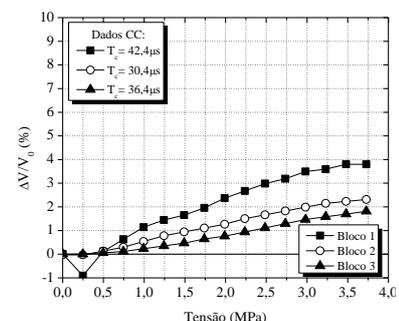
C.1.4 - Ondas V₃₁



Série I



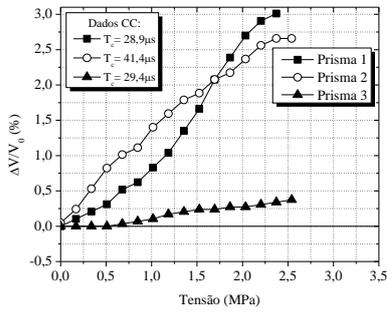
Série II



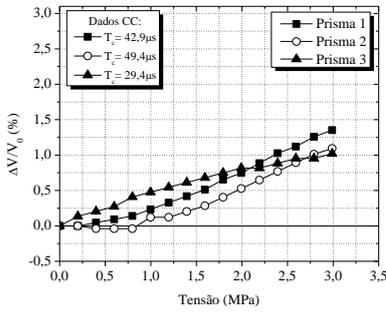
Série III

C.2 – Curvas acustoelásticas dos prismas de 2 blocos

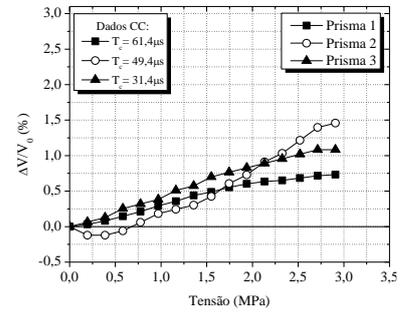
C.2.1 - Ondas V_{11}



Série I

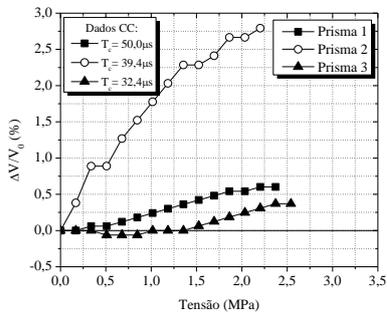


Série II

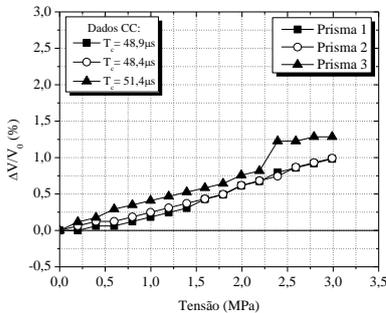


Série III

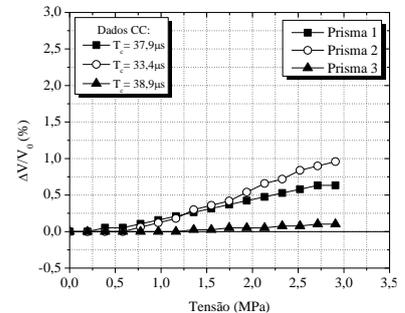
C.2.2 - Ondas V_{22}



Série I

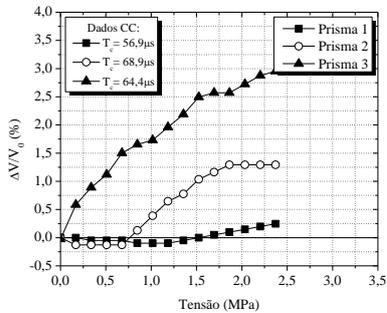


Série II

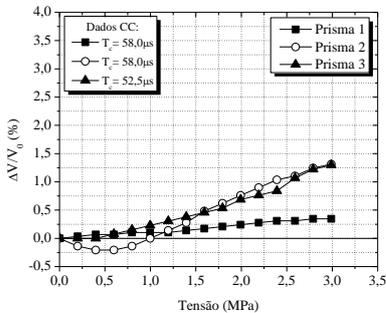


Série III

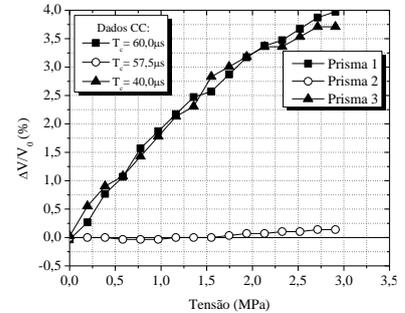
C.2.3 - Ondas V_{33}



Série I

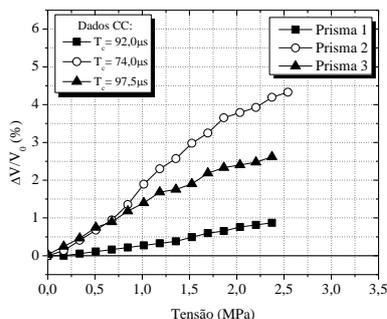


Série II

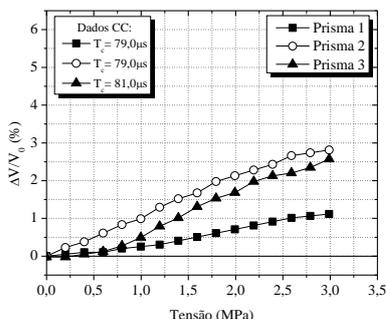


Série III

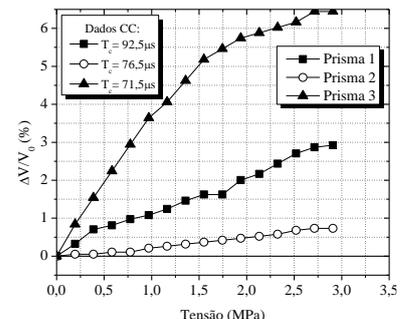
C.2.4 - Ondas V_{31}



Série I



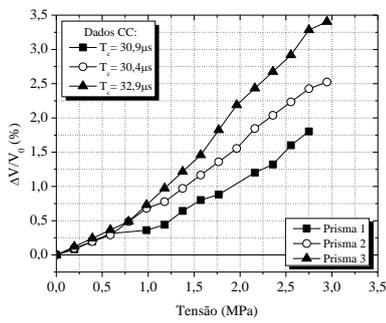
Série II



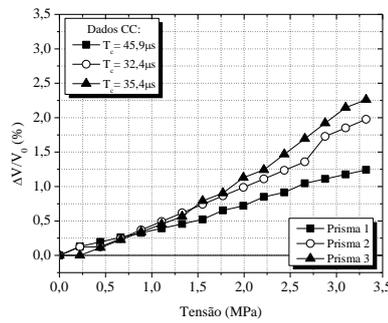
Série III

C.3 – Curvas acustoelásticas dos prismas de 3 blocos

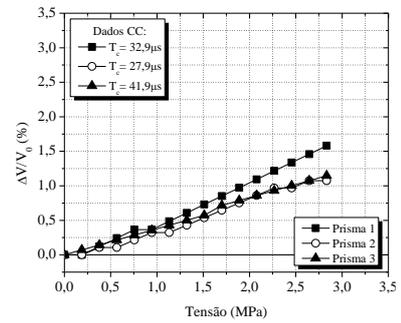
C.3.1 - Ondas V_{11}



Série I

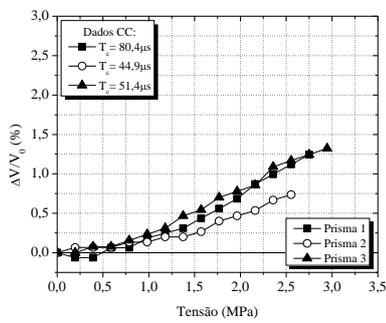


Série II

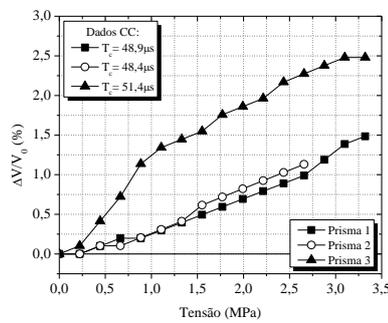


Série III

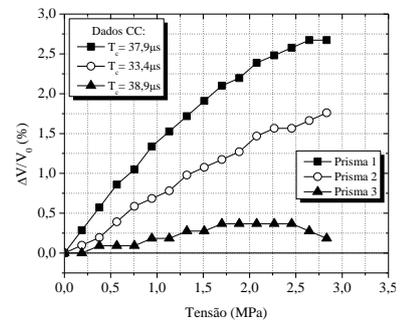
C.3.2 - Ondas V_{22}



Série I

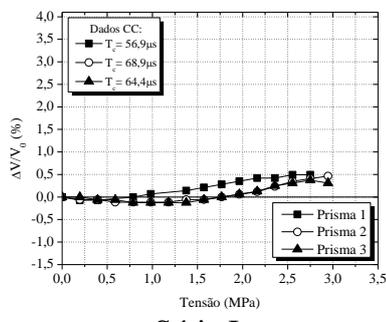


Série II

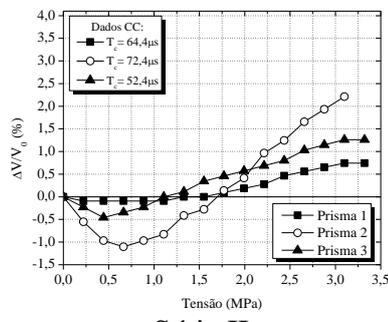


Série III

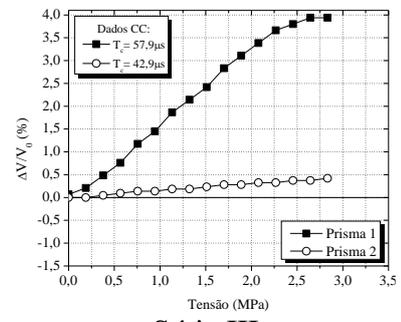
C.3.3 - Ondas V_{33}



Série I

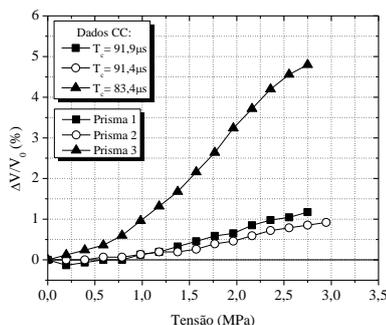


Série II

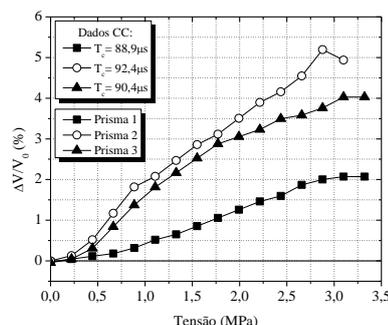


Série III

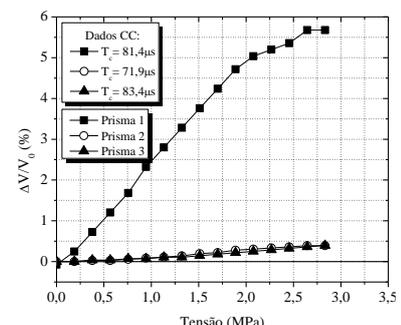
C.3.4 - Ondas V_{31}



Série I



Série II



Série III

