

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

RAFAELLA MOREIRA LIMA GONDIM

**Investigação do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria
estrutural formados por blocos de concreto**

SÃO CARLOS

2022

RAFAELLA MOREIRA LIMA GONDIM

**Investigação do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria
estrutural formados por blocos de concreto**

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. Dr. Vladimir Guilherme Haach

SÃO CARLOS

2022

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).

G637i Gondim, Rafaella Moreira Lima
 Investigação do efeito acustoelástico em
 elementos de alvenaria estrutural formados por blocos
 de concreto / Rafaella Moreira Lima Gondim;
 orientador Vladimir Guilherme Haach. São Carlos, 2022.

 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, 2022.

 1. Ensaaios Não Destrutivos. 2. Ultrassom. 3.
 Acustoelasticidade. 4. Alvenaria estrutural. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RAFAELLA MOREIRA LIMA GONDIM**.

Título da tese: "Investigação do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria estrutural formados por blocos de concreto".

Data da defesa: 27/09/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado **Vladimir Guilherme Haach (Orientador)** APROVADA
(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

Prof. Associado **Ricardo Carrazedo** APROVADA
(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

Profa. Dra. **Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira** APROVADA
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Dr. **Cláudius de Sousa Barbosa** APROVADA
(Escola Politécnica/EP-USP)

Prof. Dr. **Paulo José Brandão Barbosa Lourenço** APROVADA
(Universidade do Minho/Portugal)

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

Prof. Associado **Vladimir Guilherme Haach**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

RESUMO

GONDIM, R. M. L. **Investigação do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria estrutural formados por blocos de concreto**. 2022. 184 p. Tese (Doutorado em Ciências – Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

A teoria da acustoelasticidade relaciona a velocidade de propagação de ondas mecânicas ao estado de tensões do meio. Embora diversas pesquisas sobre o efeito acustoelástico em aço, rochas e concreto já tenham sido realizadas, a literatura sobre a acustoelasticidade na alvenaria ainda é escassa. O objetivo deste trabalho é investigar o efeito acustoelástico em elementos de alvenaria estrutural, com foco na alvenaria formada por blocos de concreto. Para tanto, o trabalho se divide em três etapas: simulação numérica estática, programa experimental e simulação numérica dinâmica. A primeira etapa de simulação numérica corresponde à modelagem dos elementos para determinação do comportamento de seus campos de tensões durante um ensaio de compressão uniaxial, com o objetivo de fornecer subsídios teóricos para o planejamento do programa experimental e auxiliar na discussão dos resultados. O programa experimental se divide em duas fases: caracterização dos materiais e avaliação da acustoelasticidade em blocos, prismas de dois e três blocos e pequenas paredes submetidos a compressão uniaxial por meio do ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU). Mostrou-se que as curvas acustoelásticas são altamente influenciadas pela tensão máxima aplicada nos blocos. Observou-se também que a presença de argamassa contribuiu para a uniformização do efeito acustoelástico em prismas. Nos elementos preenchidos, a presença do graute torna o comportamento mecânico dos elementos mais complexo e aumenta a variabilidade dos resultados. A última etapa do trabalho equivale à simulação da propagação de uma onda ultrassônica por um bloco de alvenaria submetido a diferentes níveis de compressão. Concluiu-se que a não uniformidade na distribuição das tensões no bloco e a variação na direção de propagação da onda causada pela heterogeneidade do material dificultam a obtenção de coeficientes acustoelásticos consistentes.

Palavras-chave: Ensaio Não Destrutivo; ultrassom; acustoelasticidade; alvenaria estrutural.

ABSTRACT

GONDIM, R. M. L. **Investigation of the acoustoelastic effect in masonry elements of concrete blocks.** 2022. 184 p. Thesis (PhD. in Civil Engineering (Structural Engineering)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2022.

The theory of acoustoelasticity describes the relationship between the propagation velocity of elastic waves and the stress state of a medium. Although many works concerning the acoustoelastic effect in steel, rocks and concrete have already been conducted, literature on acoustoelasticity in masonry is still scarce. The aim of this work is to investigate the acoustoelastic effect in masonry elements, focusing on masonry of concrete blocks. Therefore, this work is divided in three stages: static numerical modelling, experimental program, and dynamic numerical modelling. The first numerical simulation stage corresponds to modeling elements to determine their stress fields during a uniaxial compression test, aiming to provide theoretical background to plan the experimental program and to assist in discussions. The experimental program is divided in two phases: material characterization and acoustoelasticity evaluation in units, prisms of two and three units and wallets, with and without grout filling, subjected to uniaxial compression using the Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) method. It was showed that acoustoelastic curves in units are highly influenced by the maximum applied stress. Also, it was observed that the mortar contributed to decrease the variation of the acoustoelastic effect in prisms. With respect to grout filled elements, the grout made mechanical behavior more complex and increased variability in results. The last stage of this work is the simulation of the propagation of an ultrasonic wave through a masonry block subjected to different compression levels. It was concluded that the non-uniformity of stress distribution in blocks and that the variation in the direction of wave propagation due to material heterogeneities hinder the determination of consistent acoustoelastic coefficients.

Keywords: Non Destructive Testing; ultrasound; acoustoelasticity; masonry.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família. À minha namorada, Mônica, pelo companheirismo e pelo suporte ao longo deste trabalho. À minha mãe, meus irmãos e à minha família em São Luís por entenderem a dedicação exigida pelo doutorado e a distância física nos últimos anos.

Ao professor Vladimir, pela orientação, disponibilidade e amizade desde que eu cheguei ao Departamento de Estruturas.

Aos amigos que fiz em São Carlos pelo apoio e companhia.

A todos os funcionários do SET e, em especial, aos funcionários do laboratório, Vareda, Fabiano, Amaury, Romeu e Jorge, sem os quais este trabalho experimental não teria sido realizado.

À empresa TATU pré-moldados, pela doação de todos os blocos utilizados nesta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2017/24096-8.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Propagação de ondas: (a) longitudinais, (b) de cisalhamento, (c) Rayleigh e (d) Love.....	23
Figura 2.2 – Esquema do ensaio de velocidade de pulso ultrassônica	25
Figura 2.3 – Esquemas de posicionamento dos transdutores para o ensaio de ultra-som: (a) transmissão direta, (b) transmissão semi-direta e (c) transmissão indireta ou de superfície....	25
Figura 2.4 – Resultados de Lillamand et al. (2010): (a) curva tensão-deformação e (b) variação relativa de velocidade por tensão aplicada.....	29
Figura 2.5 – Variação relativa de velocidade em função da tensão aplicada em Shokouhi, Zöega e Wiggenhauser (2010).....	30
Figura 2.6 – Variação da frequência de ressonância por tensão aplicada obtida por Lundqvist e Rydén (2012): (a) modo de vibração torcional e (b) modo de vibração longitudinal	31
Figura 2.7 – Variação média de: (a) frequência de ressonância e (b) velocidade de propagação de ondas sônicas	32
Figura 2.8 – Amostras de concreto e nylon avaliadas por Nogueira e Rens (2019)	33
Figura 2.9 – Variação relativa de velocidade obtida por Zhong, Zhu e Morcous (2021) em cilindros de concreto.....	34
Figura 2.10 – Ensaio em viga de concreto protendido realizado por Zhong, Zhu e Morcous (2021): (a) seção da viga e (b) variação relativa de velocidade ao longo do tempo	35
Figura 2.11 – Resultados obtidos por Schiavon (2015): (a) variação relativa de velocidade com e sem a consideração da deformação do corpo de prova e (b) variação relativa de velocidade por tensão aplicada em três ciclos de carregamento diferentes.....	36
Figura 2.12 – Variação do sinal com a aplicação de tensão para ondas de cisalhamento emitidas na direção transversal ao carregamento em Bompan e Haach (2018).....	36
Figura 2.13 – Mapa de velocidades desenvolvido por Arosio et al.(2012).....	37
Figura 2.14 – Imagens de tomografia ultrassônica geradas por Zielinska e Rucka (2018), velocidades em m/s.....	39
Figura 2.15 – Previsão de resistência à compressão de paredes por meio de: (a) redes neurais artificiais e (b) sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo	39
Figura 2.16 – Correlação em blocos cerâmicos entre VPU e resistência: (a) à compressão e (b) à flexão	40
Figura 2.17 – Velocidade de pulso ultrassônico nos blocos de basalto.....	41
Figura 2.18 – Trabalho de Manning, Ramos e Fernandes (2014): (a) configuração do ensaio em paredes e (b) velocidade sônica em função da tensão aplicada	41
Figura 2.19 – Tempo de propagação medido em prismas de concreto celular autoclavado, medidas em μ s: (a) sem tensão aplicada e (b) submetidos a 50% da tensão de ruptura	43
Figura 2.20 – Comparação entre valores de VPU experimentais e numéricos	44
Figura 2.21 – Simulação de Yurikov, Lebedev e Pervukhina (2016): (a) experimento realizado e (b) modelo desenvolvido	45
Figura 2.22 – Sinal experimental e numérico obtido por Yurikov, Lebedev e Pervukhina (2016)	45
Figura 2.23 – Modelo simulado por Zhang et al. (2019): (a) esquema do experimento realizado e (b) propagação da onda	46
Figura 2.24 – Velocidade de propagação obtida por Zhang et al. (2019)	47
Figura 2.25 – Placas simuladas por Yang et al. (2019).....	47

Figura 2.26 – Ondas obtidas por Yang et al. (2019): (a) modelo linear e (b) modelo não-linear	48
Figura 2.27 – Sinais simulados por Karimpouli, Tahmasebi e Saenger (2022)	49
Figura 3.1 – Representação esquemática do programa experimental	50
Figura 3.2 – Análise dimensional dos blocos: (a) mensuração de comprimentos e (b) mensuração de espessura	51
Figura 3.3 – Pesagem hidrostática do bloco	53
Figura 3.4 – Compressão dos blocos: (a) ensaio e (b) desenho esquemático da instrumentação	54
Figura 3.5 – Ensaio de resistência à compressão de um meio-bloco	55
Figura 3.6 – Instrumentação no ensaio de resistência à compressão da argamassa	57
Figura 3.7 – Prismas prontos: (a) verificação do nível e (b) aparência final	58
Figura 3.8 – Prismas de: (a) dois blocos e (b) três blocos	58
Figura 3.9 – Instrumentação dos ensaios de resistência à compressão dos prismas: (a) de dois blocos e (b) de três blocos	59
Figura 3.10 – Estrutura para transporte das paredes: (a) base pronta e (b) forma montada	60
Figura 3.11 – Ensaio de resistência à compressão de pequenas paredes: (a) instrumentação e (b) perfil metálico utilizado para distribuição do carregamento	60
Figura 3.12 – Ensaio de abatimento do tronco de cone do graute	61
Figura 3.13 – Blocos preenchidos	62
Figura 3.14 – Configuração do ensaio de resistência à compressão dos blocos preenchidos com graute	62
Figura 3.15 – Esquema simplificado de carregamento	63
Figura 3.16 – Pontos analisados com o ultrassom em: (a) blocos, (b) prismas com dois blocos, (c) prismas com três blocos, (d) pequenas paredes	64
Figura 3.17 – Caixa seletora	65
Figura 3.18 – Equipamentos utilizados para a realização do ensaio de VPU: (a) aparelho PunditLab e (b) transdutor de cisalhamento de 250kHz	66
Figura 3.19 – Verificação da calibração do aparelho de ultrassom: (a) cilindro de calibração e (b) aparelho com calibração verificada	67
Figura 3.20 – Fixação dos transdutores	68
Figura 3.21 – Configuração do ensaio de acustoelasticidade realizado em blocos	68
Figura 3.22 – Configuração do ensaio de acustoelasticidade realizado em prismas: (a) prisma de dois blocos vazio e (b) marcações em prisma de três blocos preenchido	69
Figura 3.23 – Pequena parede posicionada para ensaio	70
Figura 4.1 – Curvas tensão x deformação dos blocos analisados	76
Figura 4.2 – Curva tensão x deformação dos meio-blocos analisados	76
Figura 4.3 – Curva tensão x deformação dos cilindros de argamassa	79
Figura 4.4 – Curva tensão-deformação dos prismas: (a) de dois blocos e (b) de três blocos	81
Figura 4.5 – Modo de ruptura dos prismas de dois blocos	81
Figura 4.6 – Modo de ruptura dos prismas de três blocos	82
Figura 4.7 – Curva tensão-deformação das pequenas paredes	82
Figura 4.8 – Modo de ruptura das pequenas paredes	83
Figura 4.9 – Curva tensão-deformação do graute	84
Figura 4.10 – Curva tensão-deformação dos blocos preenchidos com graute	86
Figura 4.11 – Curva tensão-deformação dos prismas preenchidos com graute: (a) de dois blocos e (b) de três blocos	87

Figura 4.12 – Curva tensão-deformação das pequenas paredes preenchidas com graute	89
Figura 4.13 – Modo de ruptura dos blocos preenchidos	89
Figura 4.14 – Modo de ruptura dos prismas de dois blocos preenchidos.....	90
Figura 4.15 – Modo de ruptura dos prismas de três blocos preenchidos.....	90
Figura 4.16 – Modo de ruptura dos prismas de pequenas paredes preenchidas.....	90
Figura 4.17 – Variação relativa de velocidade medida em blocos: (a) septo interno e (b) septo externo	91
Figura 4.18 – Sinais obtidos em ensaio no septo externo do bloco 2.....	92
Figura 4.19 – Onda típica obtida experimentalmente em blocos	94
Figura 4.20 – Variação relativa de velocidade medida em blocos, carregamento : (a) septo interno e (b) septo externo	94
Figura 4.21 – Fissuração no prisma durante ensaio ultrassônico	95
Figura 4.22 – Sinais gravados durante o ensaio no prisma 1, bloco inferior, septo interno: (a) sem tensão aplicada ao fim do ensaio e (b) tensão de 0,37 MPa.....	96
Figura 4.23 – Sinal gravado sem tensão aplicada ao fim do ensaio no prisma 1, bloco superior, septo externo.....	96
Figura 4.24 – Variação relativa de velocidade em prismas de 2 blocos, bloco superior: (a) septo interno e (b) septo externo.....	97
Figura 4.25 – Variação relativa de velocidade em prismas de 2 blocos, bloco inferior: (a) septo interno e (b) septo externo.....	97
Figura 4.26 – Variação de velocidade nos prismas de 3 blocos – bloco superior: (a) septo interno e (b) septo externo	98
Figura 4.27 – Variação de velocidade nos prismas de 3 blocos – bloco intermediário: (a) septo interno e (b) septo externo	99
Figura 4.28 – Variação de velocidade nos prismas de 3 blocos – bloco inferior: (a) septo interno e (b) septo externo	99
Figura 4.29 – Fissuras na pequena parede: (a) visão geral, (b) bloco na segunda fiada e (c) bloco na quarta fiada.....	101
Figura 4.30 – Variação de velocidade nas pequenas paredes: (a) segunda fiada e (b) quarta fiada	102
Figura 4.31 – Variação de velocidade nas pequenas paredes: terceira fiada.....	102
Figura 4.32 – Variação relativa de velocidade em blocos preenchidos: (a) septo interno e (b) septo externo.....	103
Figura 4.33 – Variação relativa de velocidade em blocos preenchidos: graute	104
Figura 4.34 – Menor trajetória possível para a onda se propagando apenas pelo bloco	105
Figura 4.35 – Variação relativa de velocidade em prismas preenchidos de 2 blocos, bloco superior: (a) septo interno e (b) septo externo	106
Figura 4.36 – Variação relativa de velocidade em prismas preenchidos de 2 blocos, bloco inferior: (a) septo interno e (b) septo externo	107
Figura 4.37 – Variação relativa de velocidade em prismas de 2 blocos preenchidos, região preenchida: (a) bloco inferior e (b) bloco superior.....	108
Figura 4.38 – Variação relativa de velocidade em prismas de 3 blocos preenchidos, bloco superior: (a) septo interno e (b) septo externo	109
Figura 4.39 – Variação relativa de velocidade em prismas de 3 blocos preenchidos, bloco intermediário: (a) septo interno e (b) septo externo	109
Figura 4.40 – Variação relativa de velocidade em prismas de 3 blocos preenchidos, bloco inferior: (a) septo interno e (b) septo externo	110

Figura 4.41 – Variação relativa de velocidade em prismas de 3 blocos preenchidos, região preenchida: (a) bloco superior e (b) bloco intermediário	111
Figura 4.42 – Variação relativa de velocidade em prismas de 3 blocos preenchidos, região preenchida: bloco inferior.....	112
Figura 4.43 – Sinal obtido na região preenchida do bloco intermediário sem a aplicação de carregamento	113
Figura 4.44 – Variação relativa de velocidade em pequenas paredes: (a) blocos de quarta fiada e (b) blocos de segunda fiada	114
Figura 4.45 – Variação relativa de velocidade em pequenas paredes: blocos de terceira fiada	114
Figura 4.46 – Variação relativa de velocidade no preenchimento em pequenas paredes: (a) blocos de quarta fiada e (b) blocos de segunda fiada	116
Figura 4.47 – Variação relativa de velocidade no preenchimento em pequenas paredes: blocos de terceira fiada	116
Figura 5.1 – Seção utilizada nas simulações tridimensionais (medidas em cm).....	120
Figura 5.2 – Tipos de modelagem: (a) alvenaria real, (b) micromodelagem detalhada e (c) macromodelagem.....	121
Figura 5.3 – Elemento sólido de 8 nós	122
Figura 5.4 – Malha adotada: (a) bloco e (b) modelo completo	123
Figura 5.5 – Curva tensão x deformação do modelo de material CPD: (a) na tração e (b) na compressão	124
Figura 5.6 – Representação gráfica do ângulo de dilatância e da excentricidade	125
Figura 5.7 – Estado plano de tensões no CPD.....	125
Figura 5.8 – Representação gráfica do critério K_c	126
Figura 5.9 – Influência das condições de cura sobre a resistência à compressão do concreto	131
Figura 5.10 – Interface do TUSom: (a) gerador de malha e (b) gerador de partículas.....	133
Figura 5.11 – Interface do TUSom: (a) Pontos de Medição e (b) Linhas de Medição.....	133
Figura 5.12 – Ensaio de VPU em uma seção discretizada	134
Figura 5.13 – Interface do TUSom: Atualização de trajetórias.....	135
Figura 5.14 – Exemplo de elementos com: (a) nenhum nó intermediário e (b) nove nós intermediários	136
Figura 5.15 – Interface do TUSom: Simulação do tempo de propagação.....	136
Figura 5.16 – Indicação da seção do septo externo simulada.....	137
Figura 5.17 – Fluxograma das simulações no TUSom.....	137
Figura 5.18 – Dimensões de sólidos e poros em uma pasta de cimento hidratada.....	138
Figura 5.19 – Fluxograma da simulação de seções heterogêneas no TUSom.....	139
Figura 6.1 – Modelo tridimensional do bloco: (a) malha adotada e (b) condições de contorno	141
Figura 6.2 – Curvas tensão-deformação experimentais e simulação tridimensional do bloco	142
Figura 6.3 – Tensões principais máximas no modelo tridimensional do bloco ($\epsilon=0,75\%$)...	143
Figura 6.4 – Tensões principais mínimas no modelo tridimensional do bloco ($\epsilon=0,75\%$) ...	143
Figura 6.5 – Modelo tridimensional do prisma de dois blocos: (a) condições de contorno e (b) malha	144

Figura 6.6 – Curvas tensão-deformação experimentais e simulação tridimensional do prisma de 2 blocos: (a) sem redução de rigidez e (b) com redução do módulo de elasticidade e resistência à compressão.....	145
Figura 6.7 – Tensões principais máximas no modelo tridimensional do prisma de dois blocos ($\epsilon=0,58\%$).....	146
Figura 6.8 – Tensões principais mínimas no modelo tridimensional do prisma de dois blocos ($\epsilon=0,58\%$).....	146
Figura 6.9 – Modelo tridimensional do prisma de três blocos: (a) condições de contorno e (b) malha	147
Figura 6.10 – Curvas tensão-deformação experimentais e simulação tridimensional do prisma de 3 blocos	148
Figura 6.11 – Tensões principais máximas no modelo tridimensional do prisma de três blocos ($\epsilon=0,59\%$).....	149
Figura 6.12 – Tensões principais mínimas no modelo tridimensional do prisma de três blocos ($\epsilon=0,59\%$).....	149
Figura 6.13 – Modelo tridimensional da pequena parede: (a) condições de contorno e (b) malha	150
Figura 6.14 – Curvas tensão-deformação experimentais e simulação tridimensional da pequena parede	150
Figura 6.15 – Tensões principais no modelo tridimensional da pequena parede ($\epsilon=0,31\%$): (a) máximas e (b) mínimas	151
Figura 6.16 – Tensões principais no modelo tridimensional da pequena parede ($\epsilon=0,31\%$), bloco da terceira fiada: (a) máximas e (b) mínimas	152
Figura 6.17 – Tensões principais no modelo tridimensional da pequena parede ($\epsilon=0,31\%$), bloco da quarta fiada: (a) máximas e (b) mínimas	152
Figura 6.18 – Distribuição de tensões na seções (tensão de compressão aplicada: 0,476 kN/cm ²): (a) septo externo e (b) septo interno.....	153
Figura 6.19 – Regressão linear da curva acustoelástica referentes aos blocos 1 e 2, regime elástico	153
Figura 6.20 – Mapa de velocidades na seção do septo externo (tensão de compressão aplicada: 0,476 kN/cm ²).....	154
Figura 6.21 – Trajetória atualizada para seções com tensão de compressão aplicada de 1,10 MPa: (a) septo externo e (b) septo interno	155
Figura 6.22 – Trajetória atualizada para seções com tensão de compressão aplicada de 2,93 MPa: (a) septo externo e (b) septo interno	155
Figura 6.23 – Trajetória atualizada para seções com tensão de compressão aplicada de 4,76 MPa: (a) septo externo e (b) septo interno	156
Figura 6.24 – Comparação entre curvas experimentais e numéricas: (a) septo externo e (b) septo interno	156
Figura 7.1 – Curvas acustoelásticas obtidas nos septos internos dos blocos, tensão máxima aplicada de: (a) 70% do f_{bk} e (b) 30% do f_{bk}	159
Figura 7.2 – Curvas acustoelásticas obtidas nos septos externos dos blocos, tensão máxima aplicada de: (a) 70% do f_{bk} e (b) 30% do f_{bk}	159
Figura 7.3 – Ensaio nos blocos: (a) caracterização e (b) acustoelasticidade	160
Figura 7.4 – Modelo de compressão do bloco no ensaio de acustoelasticidade: (a) malha adotada e (b) condições de contorno	161

Figura 7.5 – Tensões máximas principais ($\epsilon = 0,075\%$) durante o ensaio: (a) de acustoelasticidade e (b) de caracterização	161
Figura 7.6 – Tensões mínimas principais ($\epsilon = 0,075\%$) durante o ensaio: (a) de acustoelasticidade e (b) de caracterização	162
Figura 7.7 - Tensões principais no modelo tridimensional do prisma de dois blocos ($\epsilon=0,58\%$): (a) mínimas e (b) máximas	162
Figura 7.8 – Tensões principais mínimas no modelo tridimensional do prisma de três blocos ($\epsilon=0,59\%$).....	163
Figura 7.9 – Deformação na parede PP1 ao longo do ensaio para avaliação da acustoelasticidade	166
Figura 7.10 – Simulação da seção heterogênea (modelo 1)	168
Figura 7.11 – Simulação da seção heterogênea (modelo 2)	168
Figura 7.12 – Simulação da seção heterogênea (modelo 3)	168
Figura 7.13 – Simulação da seção heterogênea (modelo 4)	169
Figura 7.14 – Esquema da trajetória de propagação de ondas ultrassônicas em materiais heterogêneos	170
Figura 7.15 – Variação relativa de velocidade para os quatro modelos de seção heterogênea	170
Figura 1 – Sinais típicos obtidos em blocos ocios: (a) bloco 2, carregamento máximo de 9,89 Mpa e (b) bloco 1, carregamento máximo de 5,13 MPa	181
Figura 2 - Sinais típicos obtidos em prismas ocios: (a) prisma 1, de dois blocos e (b) prisma 1, de três blocos	182
Figura 3 – Sinal típico obtido na parede PP1	182
Figura 4 – Sinais típicos obtidos no bloco 2 preenchido: (a) septo interno e (b) região do preenchimento	183
Figura 5 – Sinais típicos obtidos no prisma 1 de dois blocos preenchido: (a) bloco inferior, septo externo e (b) bloco superior, região do preenchimento.....	183
Figura 6 – Sinais típicos obtidos no prisma 3 de três blocos preenchido: (a) bloco inferior, septo externo e (b) bloco intermediário, região do preenchimento	184
Figura 7 – Sinais típicos obtidos na parede 1 preenchida, blocos de terceira fiada: (a) septo interno e (b) região do preenchimento.....	184

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Critérios de aceitação de largura, comprimento e altura dos blocos (mm)	52
Tabela 3.2 – Critérios de aceitação de espessura de paredes do bloco (mm).....	52
Tabela 3.3 – Descrição dos traços de argamassa em volume e em massa	56
Tabela 4.1 – Dimensões dos blocos (mm).....	72
Tabela 4.2 – Aceitação de largura, comprimento e altura dos blocos (mm).....	73
Tabela 4.3 – Espessura das paredes dos blocos.....	73
Tabela 4.4 – Aceitação de espessura de paredes de blocos (mm).....	73
Tabela 4.5 – Dimensões dos meio-blocos (mm)	74
Tabela 4.6 – Aceitação de largura, comprimento e altura dos meio blocos (mm).....	74
Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de absorção de água e área líquida.....	75
Tabela 4.8 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão de blocos	75
Tabela 4.9 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão dos meio-blocos	77
Tabela 4.10 – Determinação do Índice de Consistência.....	77
Tabela 4.11 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão da argamassa 1:0,5:4,5.....	78
Tabela 4.12 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão da argamassa 1:0,25:3.....	78
Tabela 4.13 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão dos prismas de dois blocos..	79
Tabela 4.14 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão dos prismas de três blocos ..	80
Tabela 4.15 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão de pequenas paredes.....	83
Tabela 4.16 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão do graute.....	84
Tabela 4.17 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão dos blocos preenchidos	85
Tabela 4.18 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão dos prismas de dois blocos preenchidos.....	87
Tabela 4.19 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão dos prismas de três blocos preenchidos.....	88
Tabela 4.20 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão de pequenas paredes preenchidas	88
Tabela 4.21 – Velocidade de propagação e comprimento de onda nos blocos	93
Tabela 4.22 – Coeficientes acustoelásticos dos blocos	94
Tabela 4.23 – Coeficientes acustoelásticos – prismas de 2 blocos.....	98
Tabela 4.24 – Coeficientes acustoelásticos – prismas de 3 blocos.....	100
Tabela 4.25 – Coeficientes acustoelásticos – pequenas paredes	103
Tabela 4.26 – Velocidade de propagação nos blocos grauteados.....	104
Tabela 4.27 – Velocidade média nos septos e graute dos blocos grauteados.....	104
Tabela 4.28 – Coeficientes acustoelásticos – blocos grauteados.....	106
Tabela 4.29 – Coeficientes acustoelásticos – prismas de 2 blocos preenchidos	107
Tabela 4.30 – Velocidade de propagação nos prismas preenchidos de dois blocos.....	108
Tabela 4.31 – Coeficientes acustoelásticos – prismas de 2 blocos preenchidos (região do preenchimento)	108
Tabela 4.32 – Coeficientes acustoelásticos – prismas de 3 blocos preenchidos	110
Tabela 4.33 – Velocidade de propagação nos prismas preenchidos de três blocos.....	111
Tabela 4.34 – Coeficientes acustoelásticos – prismas de 3 blocos preenchidos (região do preenchimento)	113
Tabela 4.35 – Coeficientes acustoelásticos – pequenas paredes preenchidas	114
Tabela 4.36 – Velocidade de propagação nas pequenas paredes	115

Tabela 4.37 – Coeficientes acustoelásticos – pequenas paredes preenchidas (região do preenchimento)	117
Tabela 5.1 – Parâmetros de material utilizados na simulação dos blocos de alvenaria	127
Tabela 5.2 – Valor da constante de energia de fratura em função da dimensão máxima característica dos agregados	129
Tabela 5.3 – Parâmetros de material utilizados na simulação tridimensional da argamassa .	130
Tabela 6.1 – Diferença de tensão no bloco tridimensional entre dados experimentais e numéricos	142
Tabela 6.2 – Diferença de tensão no prisma de 2 blocos tridimensional entre dados experimentais e numéricos	145
Tabela 6.3 – Diferença de tensão no prisma de 3 blocos tridimensional entre dados experimentais e numéricos	148
Tabela 6.4 – Diferença de tensão na pequena parede entre dados experimentais e numéricos	151
Tabela 7.1 – Coeficientes acustoelásticos nos prismas de três blocos por septo	163
Tabela 7.2 – Resumo dos coeficientes acustoelásticos em elementos sem preenchimento ...	164
Tabela 7.3 – Resumo dos coeficientes acustoelásticos em elementos sem preenchimento e com preenchimento.....	167

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos	19
1.2 Justificativa.....	19
1.3 Metodologia	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU).....	22
2.2 Teoria da Acustoelasticidade	25
2.3 Efeito acustoelástico em materiais estruturais	28
2.4 Ensaios ultrassônicos em alvenaria.....	37
2.5 Modelagem de Velocidade de Pulso Ultrassônico.....	44
2.6 Resumo do capítulo.....	49
3. METODOLOGIA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	50
3.1 Análise dimensional dos blocos	50
3.2 Absorção e área líquida dos blocos.....	52
3.3 Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos blocos	53
3.4 Caracterização da argamassa	55
3.5 Caracterização dos prismas ocos.....	57
3.6 Caracterização das pequenas paredes ocas	59
3.7 Caracterização do graute	61
3.8 Caracterização dos elementos preenchidos com graute	62
3.9 Ensaios para avaliação do efeito acustoelástico.....	63
3.10 Análise da variação relativa de velocidade em ensaios de VPU	70
3.11 Resumo do capítulo	71
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	72
4.1 Análise dimensional de blocos e meio blocos	72
4.2 Absorção de água e área líquida de blocos	74
4.3 Resistência à compressão de blocos e meio blocos	75
4.4 Caracterização da argamassa	77
4.5 Caracterização dos prismas ocos.....	79
4.6 Caracterização das pequenas paredes.....	82
4.7 Caracterização do graute	83
4.8 Caracterização dos elementos preenchidos com graute	85
4.9 Estudo da acustoelasticidade em blocos	91

4.10	Estudo da acustoelasticidade em prismas de 2 blocos.....	95
4.11	Estudo da acustoelasticidade em prismas de 3 blocos.....	98
4.12	Estudo da acustoelasticidade em pequenas paredes	101
4.13	Estudo da acustoelasticidade em blocos preenchidos.....	103
4.14	Estudo da acustoelasticidade em prismas de dois blocos preenchidos.....	106
4.15	Estudo da acustoelasticidade em prismas de três blocos preenchidos.....	108
4.16	Estudo da acustoelasticidade em pequenas paredes preenchidas	113
4.17	Resumo do capítulo	117
5.	METODOLOGIA DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	119
5.1	Aspectos gerais da primeira etapa de simulações	119
5.2	Tipo de modelagem adotado	121
5.3	Elemento finito adotado	122
5.4	Modelo de material adotado.....	123
5.5	Aspectos gerais da segunda etapa de simulações.....	132
5.6	Descrição do modelo desenvolvido no TUSom.....	137
5.7	Descrição do modelo desenvolvido no TUSom para seções heterogêneas	137
5.8	Resumo do capítulo.....	139
6.	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	141
6.1	Distribuição de tensões no bloco de alvenaria	141
6.2	Distribuição de tensões no prisma de dois blocos.....	143
6.3	Distribuição de tensões no prisma de três blocos	147
6.4	Distribuição de tensões na pequena parede.....	149
6.5	Efeito acustoelástico em seções do bloco	152
6.6	Resumo do capítulo.....	158
7.	ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	159
7.1	Distribuição de tensões durante os ensaios de acustoelasticidade	159
7.2	Comparações entre blocos, prismas e paredes	164
7.3	Análise da influência do preenchimento com graute	166
7.4	Análise da variação de velocidade com a aplicação de tensão considerando seções heterogêneas	168
7.5	Resumo do capítulo.....	171
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	172
8.1	Conclusões	172
8.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	174
	REFERÊNCIAS	175

APÊNDICE – SINAIS TÍPICOS DOS ENSAIOS DE ULTRASSOM EM ELEMENTOS DE ALVENARIA.....	181
---	-----

1. Introdução

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são caracterizados por causar pouco ou nenhum dano à amostra avaliada. Portanto, a utilização de ENDs para a avaliação de uma estrutura possibilita a execução de ensaios em qualquer ponto desejado e o acompanhamento da evolução das propriedades de um mesmo elemento ao longo do tempo. Este tipo de ensaio pode ser utilizado também como complemento a ensaios destrutivos, uma vez que permite a obtenção de equações de correlação que podem ser extrapoladas para toda a estrutura. O uso destes ensaios representa ainda uma redução no custo de avaliação da estrutura, uma vez que ENDs dispensam a necessidade de recuperação do elemento posteriormente à execução do ensaio. Neste sentido, o uso de ensaios não destrutivos se mostra vantajoso para avaliação de elementos estruturais em serviço.

Entre os ENDs mais utilizados, podemos citar o método da Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU), que consiste em utilizar a velocidade de propagação de um pulso ultrassônico por um meio sólido para a obtenção de informações como homogeneidade, profundidade de fissuras, presença de imperfeições e variações do material ao longo do tempo (ABNT NBR 8802:2019).

Uma outra aplicação possível do ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico é a avaliação do nível de tensão da amostra por meio da teoria da acustoelasticidade. Esta teoria foi desenvolvida matematicamente por Hughes e Kelly (1953) e afirma que uma mudança no estado de tensões do material implica em uma variação em suas propriedades acústicas, como a velocidade de propagação de ondas mecânicas. Portanto, a partir desta teoria, uma vez conhecida a variação de velocidade de propagação em um material é possível determinar o seu nível de tensão.

Embora já existam trabalhos sobre a aplicação da teoria da acustoelasticidade em elementos de concreto, aço e rochas, a investigação deste fenômeno em elementos de alvenaria estrutural ainda é incipiente. Os componentes principais de um elemento de alvenaria estrutural são bloco e argamassa. Se houver necessidade, o elemento pode ser composto ainda por graute e armaduras. A alvenaria estrutural apresenta a vantagem de reduzir os custos da obra com fôrma e revestimentos. Outra vantagem do sistema é a redução de especializações no canteiro, uma vez que se diminui a necessidade de armadores e carpinteiros. Por outro lado, a execução da alvenaria exige mão-de-obra qualificada. O sistema apresenta as desvantagens de dificultar modificações na arquitetura pelo usuário e exigir maior cuidado com a compatibilização entre o projeto estrutural e os projetos de instalações.

Além disso, o comportamento da distribuição das ações verticais em paredes de alvenaria estrutural ainda não é totalmente compreendido pelos projetistas. Quando ocorre a aplicação de um carregamento sobre uma área ou ponto isolado da alvenaria, ocorre o “espalhamento” desta tensão ao longo da parede. Segundo Ramalho e Corrêa (2003), esta distribuição também pode ocorrer entre duas paredes diferentes, através da amarração entre elas, sendo que o tipo de amarração influencia nesta distribuição. Portanto, os autores ressaltam a importância de compreender o comportamento da interação entre as paredes para determinar o nível de tensão em estruturas de alvenaria.

Neste sentido, o uso de ensaios não destrutivos e da teoria da acustoelasticidade aplicados ao estudo da distribuição de tensões em elementos de alvenaria estrutural oferece uma possibilidade de contribuição à compreensão deste fenômeno.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é investigar a aplicação da teoria da acustoelasticidade em elementos de alvenaria estrutural de blocos de concreto por meio do ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico.

Para tanto, serão buscados os seguintes objetivos específicos:

- Determinar a distribuição dos campos de tensão em elementos de alvenaria (bloco, prismas de dois e três blocos e pequena parede) por meio de modelagem numérica;
- Demonstrar a ocorrência do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria;
- Desenvolver uma metodologia de ensaio para determinação do efeito acustoelástico em blocos, prismas e pequenas paredes;
- Estabelecer os coeficientes acustoelásticos dos elementos avaliados;
- Estudar a influência do preenchimento com graute nas propriedades acustoelásticas de cada tipo de elemento avaliado;
- Desenvolver um modelo numérico que mostre a passagem da onda pelo bloco comprimido a fim de compreender melhor o fenômeno da acustoelasticidade.

1.2 Justificativa

A investigação da teoria da acustoelasticidade se justifica pela necessidade de se conhecer o estado de tensões de elementos estruturais em serviço. Ao longo da vida útil de uma estrutura, é possível que a distribuição do carregamento aplicado seja diferente da situação de projeto ou que as propriedades do material sofram alterações. Nestas situações, a determinação

da tensão suportada pelo elemento é fundamental para o estudo da segurança do elemento e a escolha do processo de recuperação adequado.

Em estruturas de alvenaria, o estudo da distribuição de tensões no elemento é de particular importância devido ao fenômeno do espalhamento de tensões entre paredes adjacentes. A determinação correta do campo de tensões na alvenaria é fundamental para que se atinja um grau satisfatório de segurança com a maior economia.

O uso do ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico aliado à teoria da acustoelasticidade é interessante por este ser um ensaio não destrutivo. O estudo da aplicação de ENDs é justificado pelas vantagens que este tipo de ensaio oferece, tais como a possibilidade de obtenção de dados sem danificação da estrutura e baixo custo.

Embora o uso da alvenaria estrutural como sistema construtivo já seja bem difundido no Brasil e no mundo, a investigação do efeito acustoelástico neste material é incipiente. A determinação do estado de tensões de uma parede de alvenaria estrutural através de um ensaio não destrutivo é uma ferramenta útil ao mercado para a manutenção adequada de estruturas em serviço. Por outro lado, conhecer o comportamento do espalhamento de tensões ajudaria projetistas a fazerem projetos mais econômicos com segurança. Portanto, este trabalho visa ampliar o conhecimento acerca do fenômeno a fim de facilitar a aplicação de ensaios não destrutivos à alvenaria e contribuir para o melhor controle de qualidade deste sistema construtivo.

1.3 Metodologia

A metodologia deste trabalho se divide em cinco etapas: revisão bibliográfica, simulação numérica para estudo da distribuição de tensão nos elementos de alvenaria, programa experimental, simulação numérica da propagação da onda durante o ensaio de VPU e discussão dos resultados obtidos.

Revisão bibliográfica: esta etapa consistiu no levantamento bibliográfico em livros, teses, artigos e afins do estado da arte de temas relevantes à realização da pesquisa, tais como o ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico, a teoria da acustoelasticidade, a avaliação de alvenaria por meio de ensaios não destrutivos e técnicas de análise de sinal.

Programa experimental: esta etapa se dividiu em duas fases – caracterização dos materiais e estudo da acustoelasticidade nos elementos de alvenaria. A caracterização visou estudar o comportamento mecânico (resistência à compressão, módulo de deformação) dos diferentes elementos estruturais (blocos, prismas e pequenas paredes) e materiais (argamassa e graute) utilizados. Estes resultados foram necessários para fornecer os parâmetros utilizados

em modelagem e para planejar o carregamento a ser utilizados nos ensaios para avaliação do efeito acustoelástico. A fase de ensaios referente à análise da acustoelasticidade consistiu na realização de ensaios de VPU em elementos submetidos a compressão uniaxial a fim de verificar a variação de velocidade ultrassônica com a aplicação de tensão.

Primeira etapa de simulação numérica: esta etapa consistiu na modelagem de elementos de alvenaria (bloco, prismas e pequena parede com e sem preenchimento) a fim de verificar a distribuição do campo de tensões em tais elementos durante um ensaio de compressão axial. O objetivo desta etapa consistiu em fornecer uma base teórica acerca da tensão desenvolvida nos elementos para a discussão dos resultados experimentais.

Segunda etapa de simulação numérica: esta etapa objetivou modelar a propagação de ondas por seções do bloco comprimido avaliado durante o programa experimental, a fim de discutir fatores intrínsecos ao material e à estrutura dos blocos que afetam a avaliação da acustoelasticidade.

Análise de resultados: os ensaios de Velocidade de Pulso Ultrassônico geram como resultados o tempo de chegada da onda e os sinais obtidos a partir da propagação destas ondas pelo meio. Para a mensuração do efeito acustoelástico, entretanto, a determinação da variação de velocidade considerando apenas o tempo de chegada obtido em ensaio não se mostra suficientemente precisa. Portanto, o método utilizado para avaliação da variação de velocidade no presente trabalho consistiu na aplicação da função correlação cruzada na região do sinal correspondente à onda de cisalhamento. Esta etapa teve como objetivos determinar o comportamento da curva variação relativa de velocidade por tensão aplicada em cada elemento estudado, assim como estabelecer os seus respectivos coeficientes acustoelásticos.

2. Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta o estado da arte de temas relacionados a este trabalho. O capítulo se divide nos seguintes tópicos: Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU); teoria da acustoelasticidade e sua aplicação em diversos materiais estruturais; ensaios ultrassônicos em alvenaria; e simulação numérica do ensaio de VPU.

Os trabalhos consultados foram fundamentais ao planejamento das atividades a serem realizadas ao longo desta pesquisa. Neste sentido, as dificuldades encontradas por outros pesquisadores ao realizar ensaios ultrassônicos em alvenaria e ao realizar simulações de ensaios ultrassônicos foram considerados durante o planejamento do programa experimental e dos programas numéricos deste trabalho.

2.1 Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)

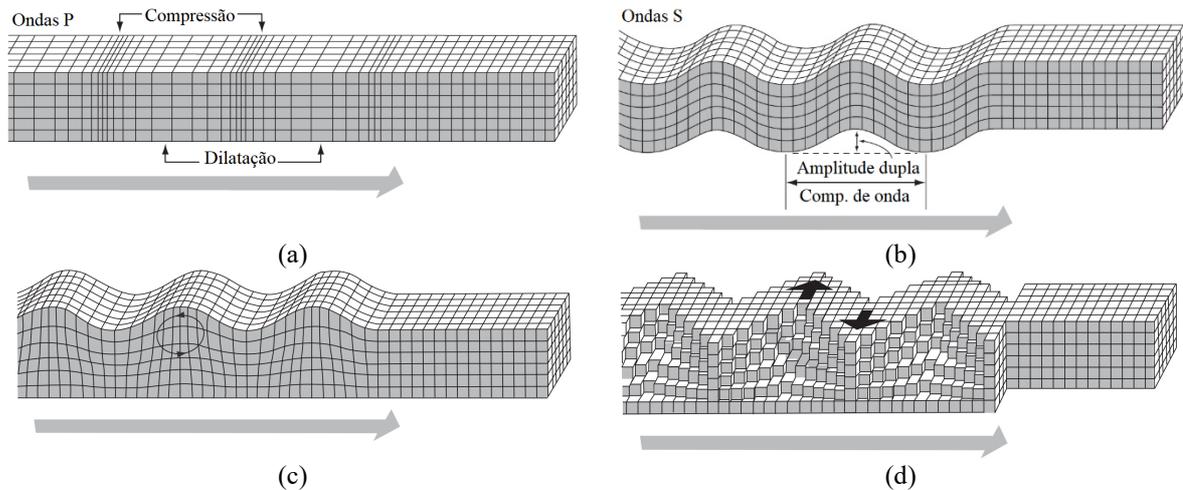
O ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico consiste em registrar o tempo que um pulso ultrassônico leva para percorrer um meio sólido de comprimento conhecido e , a partir destas informações, determinar a velocidade de propagação da onda no meio. A partir da velocidade de propagação, é possível obter indiretamente informações sobre outras propriedades do material.

Ondas ultrassônicas são ondas mecânicas emitidas com frequência superior a 20kHz. Este tipo de onda se caracteriza por precisar de um meio para sua propagação. Existem vários tipos de onda acústicas, que são classificadas conforme sua propagação e polarização. As ondas que se propagam pelo volume do material são chamadas de ondas longitudinais (Figura 2.1a) e ondas de cisalhamento (Figura 2.1b). As ondas longitudinais ou ondas primárias se caracterizam por terem mesma direção de propagação e polarização da onda; já as ondas de cisalhamento se caracterizam por terem direção de propagação da onda perpendicular à direção de vibração das partículas. As velocidades de propagação destas ondas podem ser definidas como funções das propriedades elásticas do material (módulo de elasticidade, E , coeficiente de Poisson, ν , e densidade do material, ρ , de acordo com as Equações (2.1) e (2.2) para materiais homogêneos e isotrópicos.

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (2.1)$$

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

Figura 2.1 – Propagação de ondas: (a) longitudinais, (b) de cisalhamento, (c) Rayleigh e (d) Love



Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

Por outro lado, existem tipos de ondas que se propagam pela superfície do material, entre as quais podemos citar as ondas Rayleigh (Figura 2.1c), ondas Love (Figura 2.1d) e ondas Lamb. As ondas Rayleigh se caracterizam por ser uma combinação das ondas longitudinais e de cisalhamento se propagando na superfície do material. Esta combinação faz com que a vibração das partículas ocorra de forma elíptica. As ondas Love se caracterizam pela movimentação das partículas na direção perpendicular à propagação da onda na superfície do material. Ondas Lamb correspondem a um tipo particular de ondas Rayleigh que ocorre em placas em que a espessura do material é inferior a um comprimento de onda.

O comprimento de onda é diretamente proporcional à velocidade do meio e inversamente proporcional à frequência da onda, conforme a Equação (2.3). Portanto, em um teste ultrassônico, o comprimento de onda pode ser controlado a partir da frequência da onda emitida. Estas duas grandezas são importantes porque a sensibilidade do ensaio ultrassônico depende do comprimento de onda utilizado, uma vez que a propagação da onda sofre alterações quando passa por heterogeneidades ou fissuras de tamanho superior a um comprimento de onda. Logo, quanto menor o comprimento, maior a sensibilidade da onda a variações no meio.

$$V = \lambda \cdot f \quad (2.3)$$

Por outro lado, a adoção de um comprimento de onda muito baixo pode ser prejudicial à avaliação de materiais heterogêneos. Segundo Blanco (2015), se as partículas de um material com propriedades elásticas diferentes do meio forem de tamanho inferior a um comprimento de onda, o meio pode ser considerado isotrópico. Entretanto, na hipótese contrária, parte da

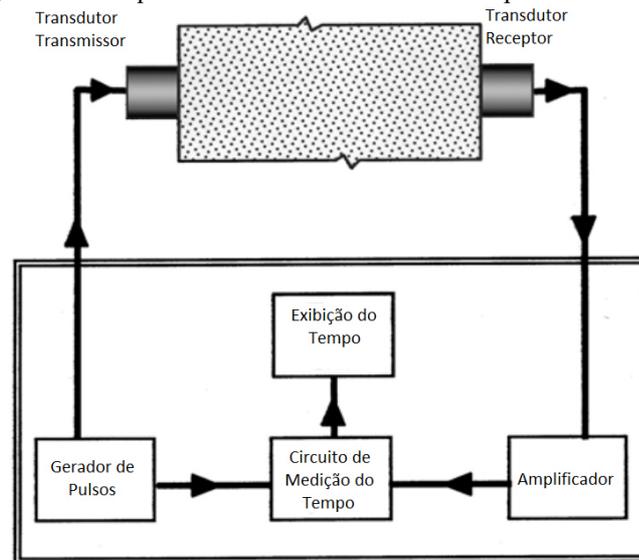
energia da onda é desviada ao se propagar por estas partículas. Sempre que a onda passa por materiais de diferentes densidades ou velocidades de propagação, ocorre uma variação na impedância acústica que dispersa parte da energia da onda (KRAUTKRÄMER E KRAUTKRÄMER, 1990). Este fenômeno, chamado de espalhamento, impõe limitações nas frequências que podem ser utilizadas em ensaios com materiais heterogêneos. Naik, Malhotra e Popovics (2004) mencionam que o limite de frequência que pode ser utilizado para avaliação de concreto é de 500 kHz, que geraria um comprimento de onda de cerca de 10 mm.

O espalhamento é um caso particular de atenuação, que corresponde à perda gradual de energia, e conseqüentemente de amplitude da onda ao se propagar por um meio. Além do espalhamento, existem outros dois mecanismos que geram atenuação: a absorção e a atenuação geométrica. A absorção é também chamada de atenuação intrínseca dos materiais; todo meio absorve gradualmente parte da energia da onda que se propaga por ele. Conforme as partículas vibram com a passagem da onda, parte dessa energia é dissipada na forma de calor. A quantidade de energia perdida varia com o material. Já a atenuação geométrica se caracteriza pela quantidade de energia perdida pela onda ao se deslocar pelo volume do meio. Este tipo de atenuação se relaciona apenas à forma de propagação da onda. De modo geral, a diminuição da amplitude da onda devido à atenuação ocorre de forma exponencial.

Os equipamentos básicos para a realização do ensaio de ultrassom são os transdutores emissor e receptor, o aparelho de ultrassom e os cabos coaxiais. Um esquema simplificado do ensaio é mostrado na Figura 2.2. O gerador de pulsos cria um pulso elétrico que é transmitido ao transdutor emissor por um cabo coaxial. Um cristal piezoelétrico dentro do transdutor transforma este pulso elétrico em energia mecânica e a transmite para a amostra. A onda mecânica percorre a amostra e encontra o transdutor receptor. Neste ponto, a onda mecânica é novamente convertida em pulso elétrico e reenviada ao aparelho de ultrassom. Como o sinal é atenuado ao se propagar pelo meio, o aparelho de ultrassom amplifica o sinal obtido antes de exibi-lo ao usuário.

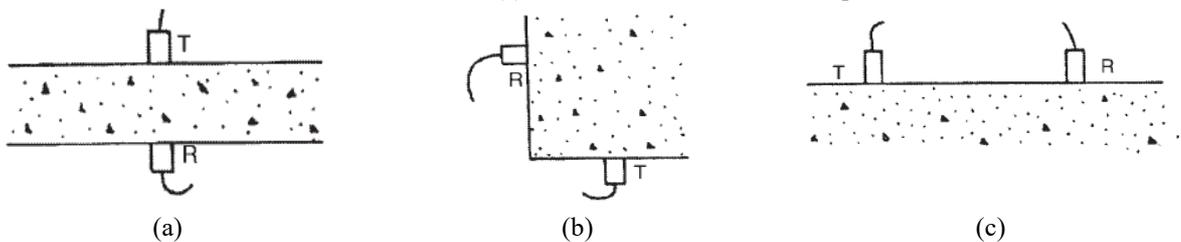
Os transdutores podem ter três tipos de posicionamento ou arranjo: transmissão direta; transmissão semidireta; e transmissão indireta (Figura 2.3). A transmissão direta é a mais recomendada por proporcionar uma menor perda de energia entre o emissor e o receptor (NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004). Os outros arranjos são utilizados em situações especiais. A transmissão semi-direta é utilizada quando se deseja evitar que ondas se propaguem pela armaduras presentes no concreto. A transmissão indireta normalmente é utilizada quando há acesso a apenas um lado da estrutura.

Figura 2.2 – Esquema do ensaio de velocidade de pulso ultrassônica



Fonte: adaptado de ASTM C597-09 (2010)

Figura 2.3 – Esquemas de posicionamento dos transdutores para o ensaio de ultra-som: (a) transmissão direta, (b) transmissão semi-direta e (c) transmissão indireta ou de superfície.



Fonte: Popovics (2003)

2.2 Teoria da Acustoelasticidade

A teoria da acustoelasticidade relaciona a velocidade de propagação de ondas mecânicas ao estado de tensões do meio. Ortega et al. (2011) mostram que, em um material que segue a lei de Hooke e está sujeito a deformações infinitesimais, esta relação não ocorre. Segundo os autores, este efeito só pode ser observado quando o meio está sujeito a deformações não infinitesimais e tem um comportamento elástico não-linear, com consideração de constantes elásticas de terceira ordem.

A formulação clássica da acustoelasticidade apresentada por Hughes e Kelly (1953) considera a teoria de deformações finitas de Murnaghan (1951) e um material sólido, homogêneo e isotrópico, com aplicação de tensão uniaxial. No modelo de Hughes e Kelly (1953), a posição final (x_i), que não pode ser confundida com a inicial (a_i), é definida pela soma de uma parcela finita e uma parcela infinitesimal, $U_i(a)$, referente ao deslocamento gerado pela propagação da onda. A relação entre essas posições é dada pelo vetor de

transformação A_i . Dessa forma, a relação entre deformação (η_{ij}) e deslocamento (u_i) não é definida de forma linear, sendo adotada a deformação de Green.

$$x_i = A_i a_i + U_i(a) \quad (2.4)$$

$$u_i = (A_i - 1)a_i + U_i(a) \quad (2.5)$$

$$(A_i - 1)a_i \gg U_i(a) \quad (2.6)$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial a_j} + \frac{\partial u_j}{\partial a_i} + \frac{\partial u_k}{\partial a_i} \frac{\partial u_k}{\partial a_j} \right) \quad (2.7)$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{2} (A_i^2 - 1) \delta_{ij} + \frac{A_i A_j}{2} \left(\frac{\partial U_i(a)}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j(a)}{\partial x_i} \right) \quad (2.8)$$

Assim como o deslocamento, a deformação também pode ser definida como a soma de uma parcela finita homogênea (α_i) e uma parcela infinitesimal (ε_{ij}).

$$\alpha_i = \frac{1}{2} (A_i^2 - 1) \quad (2.9)$$

Considerando a deformação finita homogênea elevada ao quadrado é desprezível em comparação a seu valor inicial, podemos aproximar o vetor de transformação A_i a soma de α_i à unidade.

$$\alpha_i^2 \ll 1 + 2\alpha_i \quad (2.10)$$

$$A_i = \sqrt{1 + 2\alpha_i} \approx \sqrt{(1 + \alpha_i)^2} = 1 + \alpha_i \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i(a)}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j(a)}{\partial x_i} \right) \quad (2.12)$$

$$\eta_{ij} = \alpha_i \delta_{ij} + (1 + \alpha_i + \alpha_j) \varepsilon_{ij} \quad (2.13)$$

A consideração dos termos de terceira ordem é feita por meio da definição da energia de deformação específica (ψ), em função das constantes de Murnaghan (m, n, l), constantes de Lamé (λ, μ) e dos invariantes do tensor de deformações (I_1, I_2, I_3). Nesta equação, os termos que envolvem a multiplicação de deformações não são desprezados. Derivando esta expressão em função da deformação, é encontrado o segundo tensor de tensões de Piola-Kirchoff (S_{ij}), de lei constitutiva não linear.

$$\psi = \frac{(\lambda + 2\mu)}{2} I_1^2 - 2\mu I_2 + \frac{(l + 2m)}{3} I_1^3 - 2m I_1 I_2 + n I_3 \quad (2.14)$$

$$I_1 = \eta_{ii} \quad (2.15)$$

$$I_2 = \frac{(\eta_{ii}\eta_{jj} - \eta_{ij}\eta_{ji})}{2} \quad (2.16)$$

$$I_3 = e_{ijk}\eta_{1i}\eta_{2j}\eta_{3k} \quad (2.17)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial \psi}{\partial \eta_{ij}} \quad (2.18)$$

Haach (2017) apresenta as tensões de Cauchy calculadas a partir do segundo tensor de tensões de Piola-Kirchoff em notação indicial. A tensão total (σ_{ij}) é dada pela soma da tensão inicial referente à deformação finita (σ_{ij}^0) acrescida de uma parcela referente à propagação da onda. O estado de tensões inicial e a matriz constitutiva (C_{ijkl}) são funções das deformações multiplicadas pelas constantes de Lamé e de Murnaghan.

$$\sigma_{ij} = J^{-1} \frac{\partial x_i}{\partial a_k} S_{kl} \frac{\partial x_j}{\partial a_l} = \sigma_{ij}^0 + C_{ijkl} \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \quad (2.19)$$

Admitindo que U corresponde à função que representa uma onda plana se deslocando na direção i, a velocidade V é dada pela solução da Equação (2.20). Estas soluções, mostradas nas Equações (2.21) a (2.25), são as expressões conhecidas da acustoelasticidade obtidas por Hughes e Kelly (1953). Nestas equações, o primeiro índice da velocidade indica a direção de propagação e o segundo indica a direção de polarização da onda, sendo 1 a direção de aplicação do carregamento.

$$Det[C_{ijkl}n_jn_l - \rho V^2 \delta_{jk}] = 0 \quad (2.20)$$

$$\rho V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[2l + \lambda + \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4m + 4\lambda + 10\mu) \right] \quad (2.21)$$

$$\rho V_{12}^2 = \rho V_{13}^2 = \mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m + \frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\mu \right] \quad (2.22)$$

$$\rho V_{22}^2 = \rho V_{33}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[2l - \frac{2\lambda}{\mu} (m + \lambda + 2\mu) \right] \quad (2.23)$$

$$\rho V_{21}^2 = \rho V_{31}^2 = \mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m + \frac{\lambda n}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right] \quad (2.24)$$

$$\rho V_{23}^2 = \rho V_{32}^2 = \mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m - \frac{\lambda + \mu}{2\mu} n - 2\lambda \right] \quad (2.25)$$

A partir do equacionamento apresentado, podemos observar a relação entre a velocidade de propagação mecânica e a tensão aplicada no meio. O comportamento do material devido ao efeito acustoelástico é regido também por suas propriedades elásticas.

2.3 Efeito acustoelástico em materiais estruturais

Os primeiros estudos experimentais a respeito do efeito acustoelástico foram aplicados a materiais metálicos. Shahbender (1961) demonstrou que a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento polarizadas na direção do carregamento era função da tensão aplicada em amostras de alumínio. O autor não observou o mesmo comportamento em ondas longitudinais propagadas perpendicularmente ao carregamento. Egle e Bray (1976) estudaram a propagação de ondas longitudinais e de cisalhamento em trilhos de aço submetidos a tração e compressão, encontrando relações lineares entre a deformação aplicada e as variações relativas de velocidade de todos os tipos de onda avaliados.

Popovics e Popovics (1991) realizaram a primeira avaliação do efeito da aplicação de tensão sobre a velocidade de pulso ultrassônico em elementos de concreto. Estudando apenas a onda longitudinal propagada perpendicularmente ao carregamento, os autores concluíram que a velocidade de propagação não depende do carregamento até 70% da tensão de ruptura. Atualmente, o efeito acustoelástico já foi amplamente demonstrado em materiais como concreto, rochas e aço.

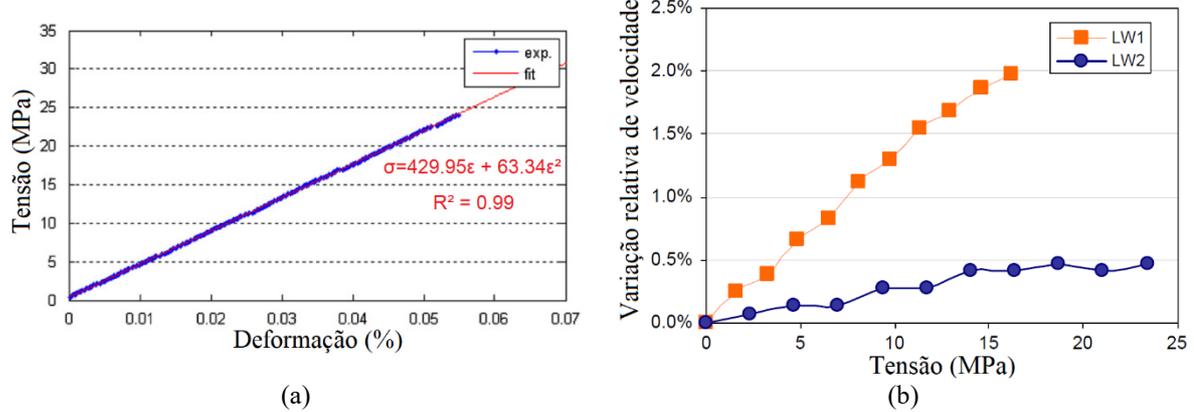
Huang, Burns e Toksoz (2001) avaliaram o efeito acustoelástico em rochas. Os autores mostraram que a variação de velocidade de propagação com a aplicação de tensão é mais bem explicada pela teoria da acustoelasticidade que pelo fechamento de microfissuras. Os autores observaram que a teoria da acustoelasticidade fornece resultados mais precisos em tensões de confinamento acima de 30 MPa em arenito Berea e acima de 40 MPa em granito de Chelmsford. Segundo os autores, estas tensões de confinamento são compatíveis com situações encontradas in situ e, portanto, o uso da teoria da acustoelasticidade é aplicável nesta situação.

Gokhale (2007) estudou a aplicação do efeito acustoelástico para determinação de tensões em trilhos de aço. O fenômeno foi estudado com ondas longitudinais, de cisalhamento, de superfície e ondas Lamb e observou-se que as ondas de superfície apresentaram maior sensibilidade à variação de tensão. O autor mostrou ainda que, quando são usadas ondas de superfície, a direção de polarização da onda também é função da tensão aplicada. De acordo

com o autor, para o material estudado, esta grandeza apresentou maior variação com o carregamento aplicado que a velocidade de propagação.

Lillamand et al. (2010) realizaram ensaios ultrassônicos em corpos de prova cilíndricos de concreto submetidos a compressão uniaxial. Os cilindros analisados pelo autor tinham dimensões de 70 mm de diâmetro e 135 mm de altura. A compressão uniaxial aplicada aos corpos de prova foi limitada ao nível máximo de tensão onde o comportamento da curva tensão-deformação do material se mostrava linear (Figura 2.4a). A variação relativa de velocidade obtida pelo autor usando ondas longitudinais emitidas na mesma direção (LW1) e perpendicularmente ao carregamento (LW2) é mostrada na Figura 2.4b.

Figura 2.4 – Resultados de Lillamand et al. (2010): (a) curva tensão-deformação e (b) variação relativa de velocidade por tensão aplicada



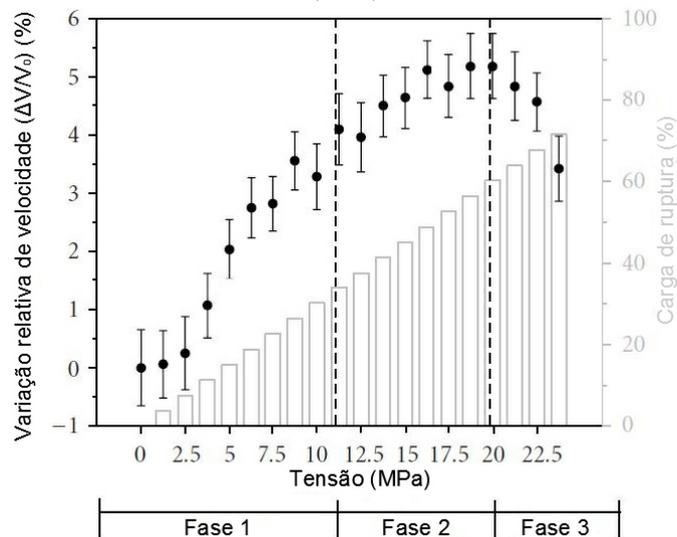
Fonte: adaptado de Lillamand et al. (2010)

A partir dos gráficos representados na Figura 2.4, Lillamand et al. (2010) mostraram que ondas propagadas no sentido de aplicação do carregamento (LW1) apresentam maior variação de velocidade que ondas propagadas transversalmente à tensão aplicada (LW2). Os pesquisadores encontraram ainda uma relação linear entre variação relativa de velocidade e tensão, expressa pela Equação (2.26). A constante que relaciona as duas grandezas (A_{ij}) corresponde ao coeficiente acustoelástico. Por fim, os autores encontraram coeficientes acustoelásticos para ondas longitudinais e de cisalhamento emitidas nas duas direções principais e mostraram que o concreto é um material cerca de dez vezes mais sensível ao efeito acustoelástico que o aço. Embora os resultados obtidos por Lillamand et al. (2010) sejam uma grande contribuição ao estudo da acustoelasticidade no concreto, e por extensão em outros materiais de comportamento frágil, é importante ressaltar que as conclusões deste estudo só são válidas para valores baixos de carregamento, onde o comportamento da curva tensão-deformação do material é linear.

$$\frac{V_{ij}^{\sigma} - V_{ij}^0}{V_{ij}^0} = \frac{\Delta V_{ij}}{V_{ij}^0} = A_{ij} \sigma_{11} \quad (2.26)$$

Shokouhi, Zöega e Wiggenhauser (2010) investigaram o efeito acustoelástico em elementos prismáticos de concreto usando ondas sônicas de superfície. Os pesquisadores afirmam que, em materiais frágeis, a velocidade da onda mecânica depende do nível de tensão aplicado, assim como da danificação sofrida pelo material. Neste trabalho, a variação de velocidade é avaliada com níveis de tensão aplicada atingindo 70% da tensão de ruptura do material. Os resultados obtidos pelos autores são mostrados na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Variação relativa de velocidade em função da tensão aplicada em Shokouhi, Zöega e Wiggenhauser (2010)

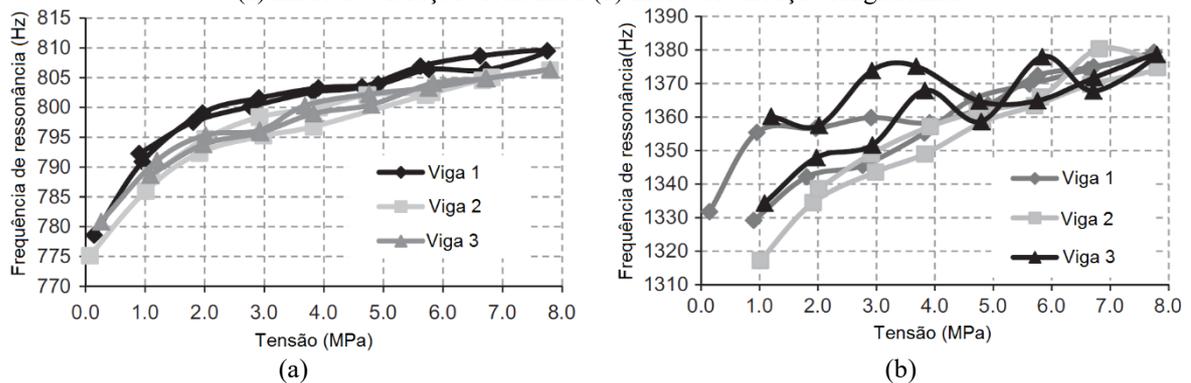


Fonte: adaptado de Shokouhi, Zöega e Wiggenhauser (2010)

Shokouhi, Zöega e Wiggenhauser (2010) mostraram que o comportamento da variação relativa de velocidade com a aplicação de tensão se divide em três fases. Na primeira fase, a tensão aplicada é suficiente para fechar as microfissuras características do material, mas não para gerar nova danificação. Nesta fase, o material ainda tem comportamento linear e a acustoelasticidade é o efeito predominante sobre a variação de velocidade. A segunda fase começa quando a curva tensão-deformação deixa de ser linear. Nesta fase, a inclinação do gráfico se reduz devido à presença da formação e abertura de fissuras no material. Por fim, a terceira fase se caracteriza pela região após o pico da variação de velocidade. Nesta etapa, a velocidade diminui progressivamente quando o material se aproxima da ruptura e as microfissuras evoluem para microfissuras.

Lundqvist e Rydén (2012) avaliaram o efeito acustoelástico em vigas de concreto protendido por meio do ensaio de ressonância acústica. Os autores afirmam que o aumento da frequência de ressonância com a aplicação de compressão já é um fenômeno conhecido, mas este comportamento não era atribuído ao efeito acustoelástico. Os autores moldaram três vigas de concreto C35 de 3 m de comprimento e estudaram a variação da frequência de ressonância das peças conforme a tensão de protensão era variada de 0 a 8 MPa no carregamento e no descarregamento. Esta frequência foi medida considerando os modos de vibração torsional e longitudinal. Como pode ser observado na Figura 2.6, houve variação da frequência de ressonância com a aplicação de tensão. Esta variação foi pequena, de ordem 10^{-2} , similar à variação de velocidade encontrada com a utilização de ensaios de Velocidade de Pulso Ultrassônico em elementos de concreto.

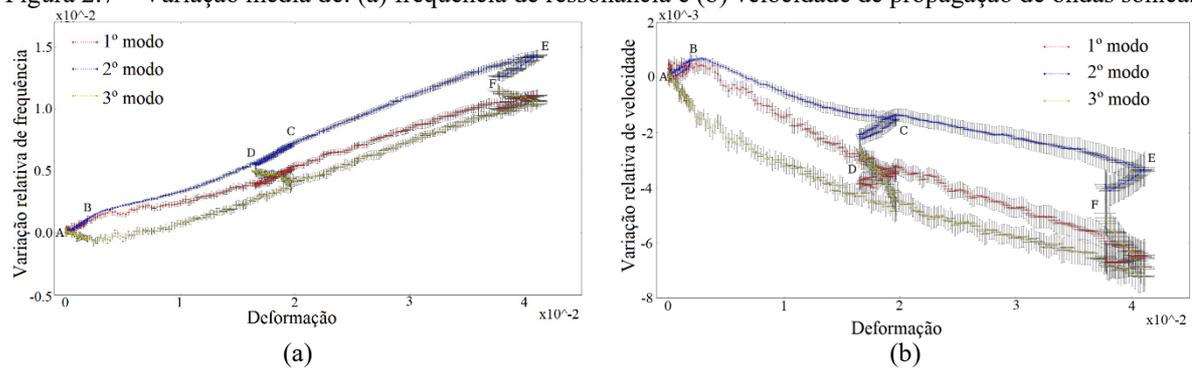
Figura 2.6 – Variação da frequência de ressonância por tensão aplicada obtida por Lundqvist e Rydén (2012): (a) modo de vibração torsional e (b) modo de vibração longitudinal



Fonte: adaptado de Lundqvist e Rydén (2012)

Eldevik (2014) também utilizou o ensaio de ressonância acústica para estudar o efeito acustoelástico, mas com foco em chapas metálicas. O autor observou variação na frequência de ressonância após a aplicação de deformação nas chapas. O efeito acustoelástico foi observado nos três primeiros modos de vibração das chapas. Foram calculadas as velocidades de propagação de ondas sônicas a partir das frequências de ressonância medidas experimentalmente. As médias dos resultados obtidos por Eldevik (2014) em 13 chapas de aço são mostradas na Figura 2.7. Eldevik (2014) ressaltou ainda a importância da definição do efeito acustoelástico em função da variação relativa de frequência e de velocidade, uma vez que o valor absoluto dessas grandezas varia com a espessura da chapa.

Figura 2.7 – Variação média de: (a) frequência de ressonância e (b) velocidade de propagação de ondas sônicas



Fonte: adaptado de Eldevik (2014)

Abbasi e Ozevin (2016) avaliaram o efeito acustoelástico em chapas de aço de alta espessura (9.53 mm e 12.7 mm) submetidas a tensões aplicadas em seu plano por meio da propagação de ondas de superfície. Os autores sugerem que, para um estado plano de tensões, a variação de velocidade relativa em um ponto qualquer é dada pela Equação (2.27), onde os coeficientes K_1 e K_2 referem-se aos coeficientes acustoelásticos definidos devido às tensões normais e K_3 corresponde ao coeficiente acustoelástico devido à tensão de cisalhamento.

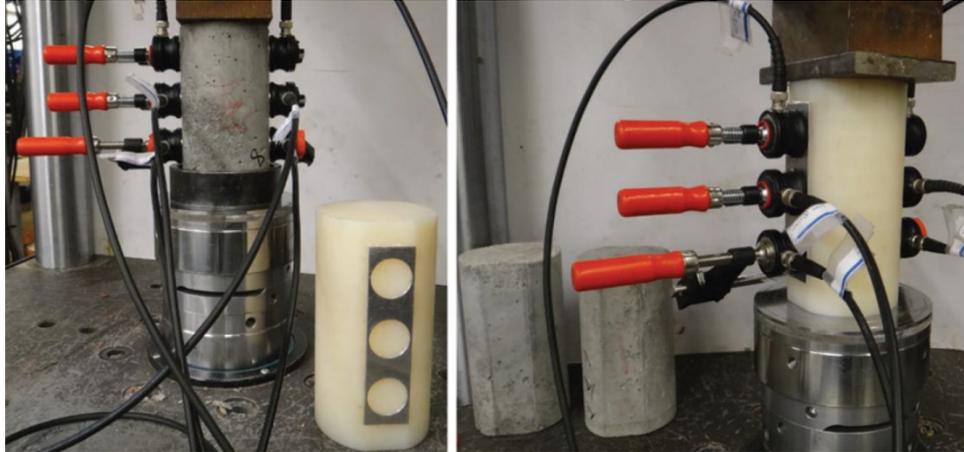
$$\frac{V_{ij}^{\sigma} - V_{ij}^0}{V_{ij}^0} = K_1 \sigma'_{11} + K_2 \sigma'_{22} + K_3 \sigma'_{12} \quad (2.27)$$

Abbasi e Ozevin (2016) realizaram uma simulação numérica por meio do Método dos Elementos Finitos a fim de determinar a frequência de excitação mais adequada ao seu programa experimental. Ondas de alta frequência poderiam ser atenuadas pela textura da superfície e ondas de baixa frequência teriam alto comprimento de onda, se propagando como ondas Lamb e, portanto, gerando coeficientes acustoelásticos variáveis com a espessura da chapa. O programa experimental consistiu na avaliação da propagação de ondas ultrassônicas de frequência de 0.5 MHz e 1 MHz em chapas de aço, considerando direções de propagação paralela, perpendicular e inclinada em relação à tração aplicada. Segundo os autores, foi encontrada uma boa correlação entre os coeficientes obtidos numericamente e experimentalmente.

Nogueira e Rens (2019) avaliaram o efeito acustoelástico em cilindros de concreto e nylon e prismas de alumínio sob compressão uniaxial. Os autores determinaram os coeficientes de terceira ordem de amostras feitas com 10 traços diferentes de concreto, utilizando ondas longitudinais e de cisalhamento propagadas perpendicularmente ao carregamento. Conforme mostrado na Figura 2.8, os autores utilizaram uma configuração que permitia que uma onda

longitudinal e duas ondas de cisalhamento (polarização paralela e perpendicular ao carregamento) fossem avaliadas simultaneamente. A tensão máxima aplicada correspondeu a 30% da resistência à compressão dos materiais.

Figura 2.8 – Amostras de concreto e nylon avaliadas por Nogueira e Rens (2019)



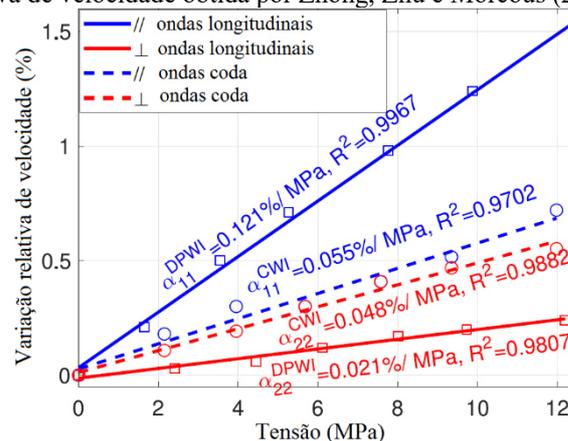
Fonte: Nogueira e Rens (2019)

Nogueira e Rens (2019) mostraram que traços de concreto podem ter diferentes comportamentos acustoelásticos e grandes variações nos coeficientes elásticos de terceira ordem mesmo que tenham resistência à compressão semelhante. Os autores mostraram também que o concreto é um material mais sensível ao efeito acustoelástico que o nylon e o alumínio. Por fim, os autores discutiram a anisotropia do material. Uma vez que o comportamento acustoelástico do material varia com a direção de avaliação mesmo com baixos níveis de carregamento, existe uma anisotropia decorrente do efeito acustoelástico. Entretanto, com o aumento do carregamento e da fissuração do material, os autores afirmam que a anisotropia introduzida pela fissuração passa a ser dominante e que, aliada ao comportamento inelástico do concreto, faz com que a teoria e as equações da acustoelasticidade tenham menor aplicabilidade.

Zhong, Zhu e Morcouis (2021) avaliaram o efeito acustoelástico em concreto em cilindros submetidos a compressão uniaxial, prismas submetidos à flexão e em uma viga protendida. Os autores sugerem que a análise de variação de velocidade seja feita por meio da interferometria de ondas longitudinais (*Direct P Wave Interferometry*, DPWI), um método que aplica a função correlação cruzada na região do sinal que corresponde às ondas primárias. Os autores definiram como limites desta região o tempo que corresponde à chegada da onda e este valor de tempo multiplicado por 1,5 uma vez que, no concreto, a razão entre o tempo de chegada das ondas de cisalhamento e ondas longitudinais é aproximadamente 1,6.

Este método é uma variação da interferometria de ondas coda (CWI), no qual a variação relativa de velocidade é obtida por meio da aplicação da função correlação cruzada na região do sinal de ondas de chegada tardia. Zhong, Zhu e Morcouc (2021) argumentam que, apesar de ondas coda serem utilizadas para detectar pequenas variações de velocidade em uma amostra, não são adequadas para a avaliação da acustoelasticidade, uma vez que as ondas de chegada tardia se caracterizam por percorrerem trajetórias com direção variável. Os autores compararam a variação relativa de velocidade obtida com a análise de ondas longitudinais e ondas coda emitidas nas direções paralela (coeficiente α_{11}) e perpendicular (coeficiente α_{22}) ao carregamento (Figura 2.9). Como pode ser observado, os resultados obtidos com ondas coda foram similares nas duas direções observadas, uma vez que esta variação corresponde a uma média do efeito acustoelástico sobre todas as direções de trajetória percorridas por estas ondas.

Figura 2.9 – Variação relativa de velocidade obtida por Zhong, Zhu e Morcouc (2021) em cilindros de concreto



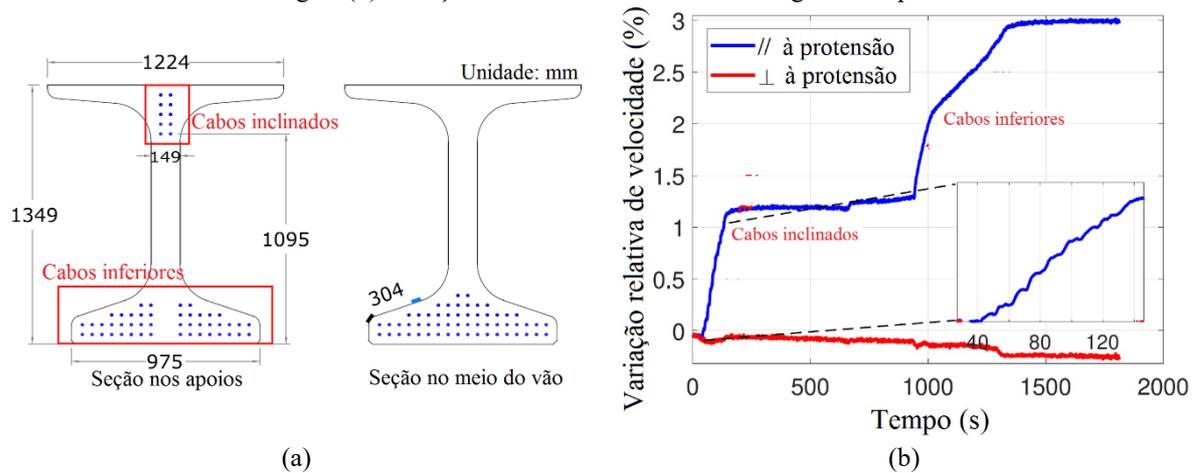
Fonte: adaptado de Zhong, Zhu e Morcouc (2021)

Zhong, Zhu e Morcouc (2021) realizaram ainda ensaios de VPU em uma viga protendida conforme a protensão era aplicada. Os autores utilizaram transdutores em arranjo indireto para medir a variação de velocidade nas direções paralela e perpendicular à protensão na região do meio do vão, parte inferior da viga. A seção e o comportamento acustoelástico da viga são mostrados na Figura 2.10. Na Figura 2.10b é possível observar o aumento da VPU ao longo do tempo em que a protensão foi aplicada. No detalhe, são mostrados os saltos no valor da VPU a cada cabo tensionado.

Schiavon (2015) estudou a acustoelasticidade em elementos prismáticos de concreto, sendo este o primeiro trabalho desenvolvido sobre o tema no Departamento de Estruturas (EESC/USP) e um dos primeiros desenvolvidos no país. Foram ensaiados 12 prismas de dimensões 15 cm x 15 cm x 50 cm de diferentes classes de resistência submetidos a compressão uniaxial e ao ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico. O ensaio de VPU foi realizado com

ondas longitudinais e de cisalhamento se propagando na direção de aplicação do carregamento e transversalmente à mesma. A autora confirmou os resultados encontrados por Lillamand et al. (2010), mostrando que ondas que se propagam na mesma direção da aplicação da tensão são mais sensíveis ao efeito acustoelástico. Além disso, foram encontrados coeficientes acustoelásticos para o concreto em cada um dos 12 prismas ensaiados.

Figura 2.10 – Ensaio em viga de concreto protendido realizado por Zhong, Zhu e Morcouc (2021): (a) seção da viga e (b) variação relativa de velocidade ao longo do tempo



(a)

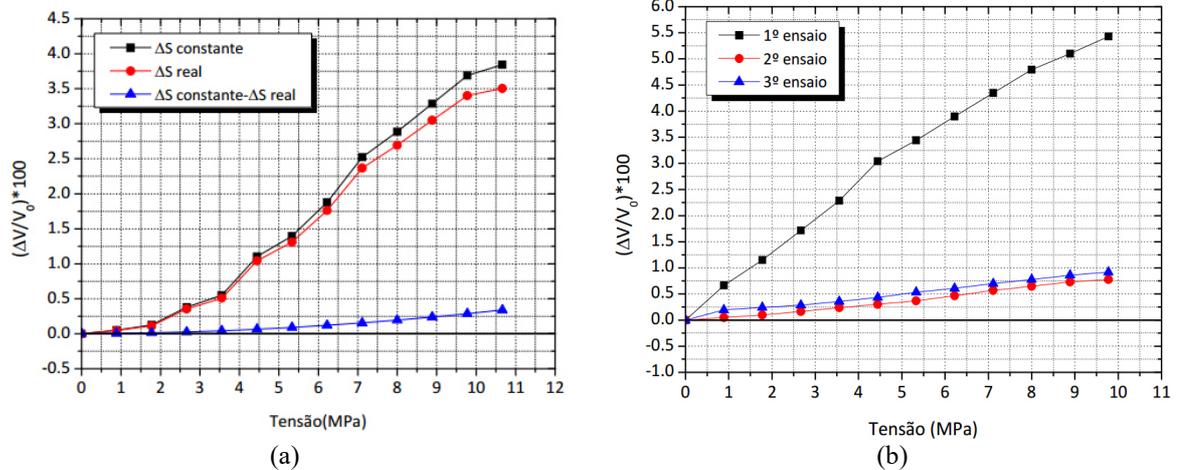
(b)

Fonte: adaptado de Zhong, Zhu e Morcouc (2021)

Um outro resultado importante obtido por Schiavon (2015) foi a demonstração de que, embora ocorra um pequeno encurtamento do corpo de prova com a aplicação de tensão, a diminuição do comprimento da trajetória e consequentemente do tempo de chegada da onda gera uma variação de velocidade desprezível quando comparada à gerada pelo efeito acustoelástico. A Figura 2.11a mostra a variação relativa de velocidade calculada desprezando a deformação longitudinal do prisma (ΔS constante), a variação considerando a deformação longitudinal (ΔS real) e a diferença entre elas (ΔS constante – ΔS real).

Por fim, Schiavon (2015) mostrou que o efeito acustoelástico em elementos de concreto é dependente do histórico de carregamento. Como pode ser observado na Figura 2.11b, há uma grande diferença na mensuração da variação relativa de velocidade quando esta é feita no primeiro ciclo de carregamento e quando é feita em ciclos posteriores. A partir deste resultado, demonstra-se a importância da aplicação de ciclos de carregamento à amostra previamente à análise da variação decorrente do efeito acustoelástico para fins de reprodução de resultados.

Figura 2.11 – Resultados obtidos por Schiavon (2015): (a) variação relativa de velocidade com e sem consideração da deformação do corpo de prova e (b) variação relativa de velocidade por tensão aplicada em três ciclos de carregamento diferentes

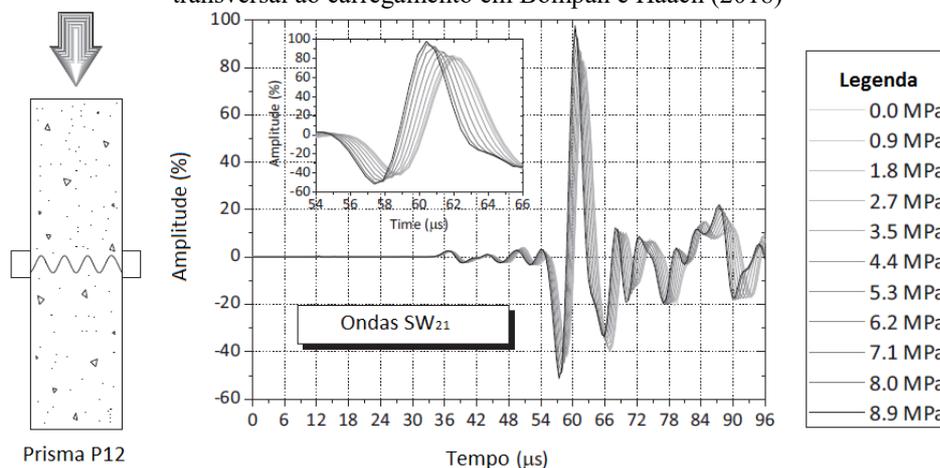


Fonte: Schiavon (2015)

Resende (2018) utilizou a interferometria de cauda de onda para avaliar o efeito acustoelástico em prismas de concreto. Foi mostrado que a metodologia de análise é adequada para a investigação da teoria da acustoelasticidade e foram determinados os valores ótimos para os parâmetros que definem a correlação cruzada entre os sinais. A autora sugeriu um método para separar os efeitos da danificação e da acustoelasticidade sobre a velocidade de pulso ultrassônica em elementos de concreto a partir de um Índice de Dano.

Bompan e Haach (2018) conseguiram mostrar a variação no sinal causada pelo efeito acustoelástico quando o meio, um prisma de concreto, foi comprimido (Figura 2.12). Nesta figura, vários sinais obtidos com diferentes níveis de tensão são sobrepostos. As linhas mais escuras indicam tensões aplicadas maiores. Estes sinais foram obtidos a partir de ondas de cisalhamento se propagando na direção transversal ao carregamento.

Figura 2.12 – Variação do sinal com a aplicação de tensão para ondas de cisalhamento emitidas na direção transversal ao carregamento em Bompan e Haach (2018)



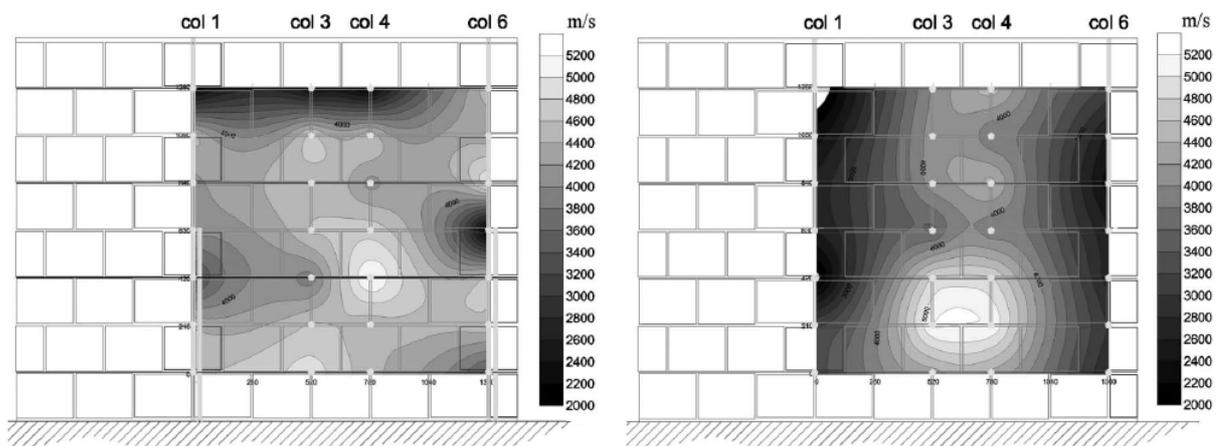
Fonte: adaptado de Bompan e Haach (2018)

2.4 Ensaios ultrassônicos em alvenaria

O uso de ensaios não destrutivos em alvenaria é bem difundido para diagnóstico e recuperação de edifícios históricos (HUSSAIN e AKHTAR, 2017; SYKORA et al., 2018; GRAZZINI e LACIDOGNA, 2021). Por sua facilidade de execução, métodos ultrassônicos são amplamente utilizados para detecção de falhas em estruturas de alvenaria. Entretanto, McCann e Forde (2001) listam algumas dificuldades na utilização de ensaios ultrassônicos neste tipo de estrutura. Segundo os autores, a maior dificuldade encontrada é a grande atenuação sofrida pelas ondas devido à grande presença de limites entre materiais (interface bloco/argamassa). Portanto, é interessante que sejam utilizados transdutores de frequências mais baixas para evitar a dispersão da onda. Uma outra dificuldade é o acoplamento do transdutor na superfície do bloco, devido à sua porosidade. A presença significativa de poros pode dificultar a execução do ensaio e a obtenção de resultados válidos, uma vez que a onda ultrassônica se propaga lentamente no ar. Os autores ressaltam que o uso do método da Velocidade de Pulso Ultrassônico em alvenaria só é eficiente em blocos individuais devido à grande atenuação na interface entre bloco e argamassa.

Arosio et al. (2012) investigou o uso de técnicas sônicas e de radar para avaliação de estruturas de alvenaria com blocos cerâmicos. Os autores mediram a velocidade de propagação de ondas sônicas usando o arranjo de transmissão direta. Em laboratório, foi desenvolvido um mapa de velocidades ao longo da superfície da parede (Figura 2.13). Concluiu-se que o método foi efetivo para detecção de áreas danificadas e colunas não preenchidas.

Figura 2.13 – Mapa de velocidades desenvolvido por Arosio et al.(2012)



Fonte: adaptado de Arosio et al. (2012)

O trabalho de Arosio et al. (2012) ofereceu soluções ao problema de atenuação em estruturas de alvenaria. Os autores utilizaram ondas sônicas, com frequência máxima de 3,5

kHz, diminuindo a dispersão da onda. Além disso, a transmissão direta no sentido da espessura da parede evitou que a onda passasse pela interface bloco/argamassa ao se propagar.

Salazar et al. (2012) utilizaram tomografia ultrassônica para analisar danificação em paredes de Ashlar. As paredes foram construídas com blocos de 40 cm x 30 cm x 20 cm e dimensão total 287 cm x 220 cm x 20 cm. A velocidade de propagação foi medida através de transmissão direta no centro de cada bloco. As paredes foram submetidas a carregamentos de 100 kN, 500 kN e 800 kN. Os resultados da tomografia ultrassônica foram combinados com dados obtidos com radar de penetração no solo. Através das imagens combinadas, os autores localizaram a presença de falhas e fissuras na alvenaria.

Sajid et al. (2018) utilizaram os ensaios de VPU e ressonância acústica para estimar a resistência à compressão de blocos de alvenaria feitos de concreto. Os ensaios não-destrutivos foram aplicados em cilindros de concreto de resistência conhecida e, a partir destes dados, foram criadas equações de correlação aplicadas aos blocos. Os autores encontraram estimativas de resistência com margem de erro de 15%.

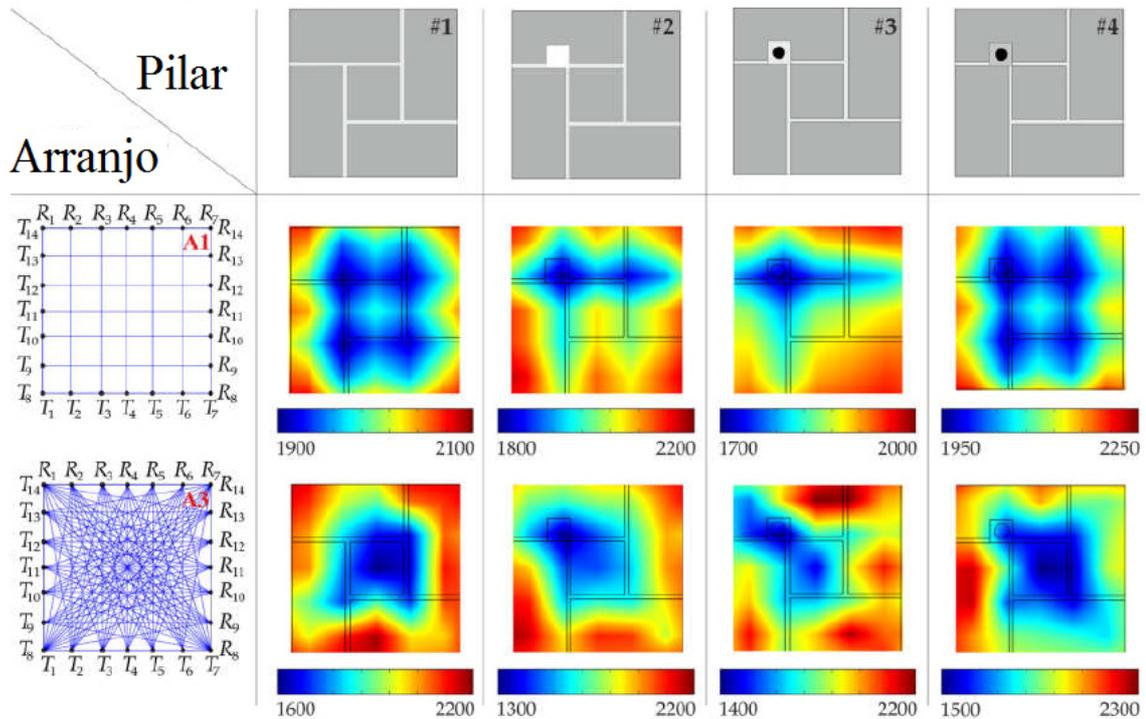
Zielinska e Rucka (2018) estudaram a possibilidade de avaliar seções de pilares de alvenaria de tijolos maciços por meio de ensaios de tomografia ultrassônica. Para tanto, as autoras construíram quatro pilares, sendo o primeiro sem defeitos, o segundo com um vazio, o terceiro com uma barra de aço envolvida por argamassa de gesso e o quarto com uma barra de aço envolvida por argamassa comum (pilares #1, #2, #3 e #4, respectivamente, na Figura 2.14).

Zielinska e Rucka (2018) observaram, conforme mostrado na Figura 2.14, que mesmo com uma malha densa de medidas experimentais, a qualidade das imagens não foi suficiente para indicar os defeitos presentes nas estruturas. As autoras atribuem a baixa qualidade das imagens à heterogeneidade da alvenaria, ou seja, a presença de poros e, principalmente da interface entre blocos e argamassa. Segundo as autoras, foi possível perceber uma redução na VPU quando a trajetória da onda passava por camadas de argamassa e, na imagem gerada, o aumento na quantidade de medidas resultou em uma zona central de menor velocidade, devido à acumulação de juntas nesta região.

Mishra, Bhatia e Maity (2019) propuseram métodos de previsão da resistência à compressão de paredes de tijolos maciços a partir de dados de ensaios de UPV e esclerometria. Os autores realizaram ensaios em 44 pequenas paredes, produzidas com três tipos de blocos. Foram comparados três modelos de análises de dados a fim de relacionar os resultados dos ensaios destrutivos e não destrutivos: regressão, redes neurais artificiais (ANN) e sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo (ANFIS). Os três métodos geraram modelos de previsão de resistência à compressão com bons coeficientes de determinação, sendo 0,937, 0,971 e 0,966,

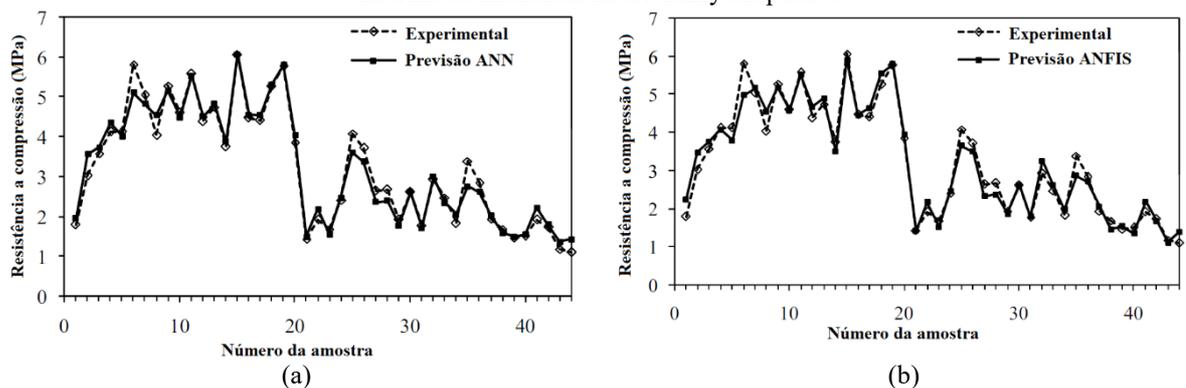
respectivamente. Os resultados obtidos por Mishra, Bhatia e Maity (2019) são mostrados na Figura 2.15.

Figura 2.14 – Imagens de tomografia ultrassônica geradas por Zielinska e Rucka (2018), velocidades em m/s



Fonte: adaptado de Zielinska e Rucka (2018)

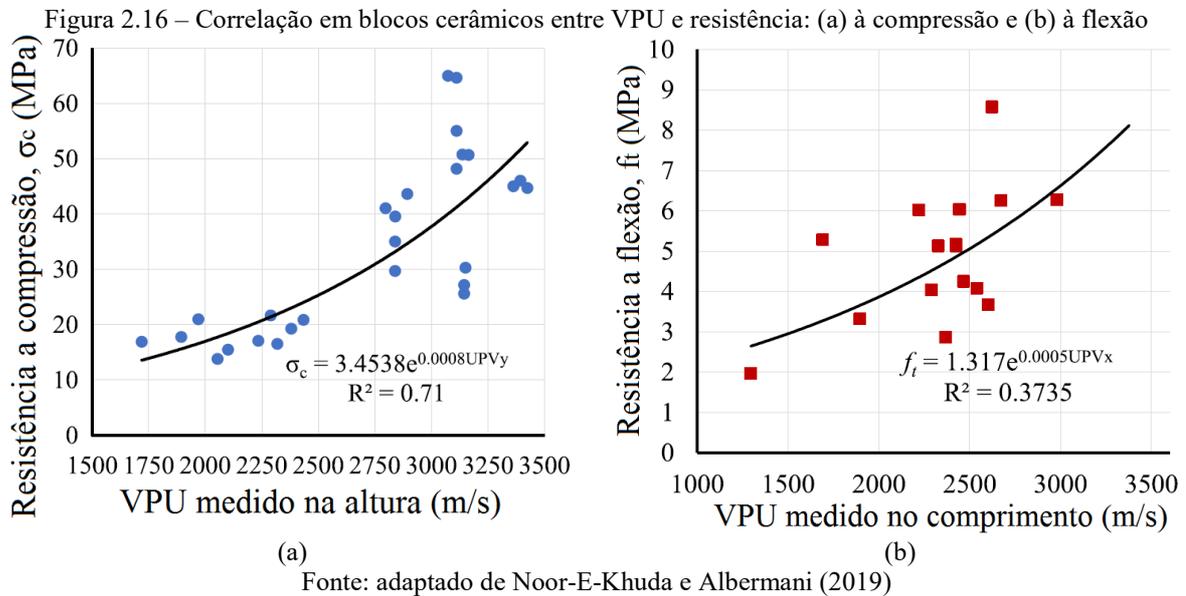
Figura 2.15 – Previsão de resistência à compressão de paredes por meio de: (a) redes neurais artificiais e (b) sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo



Fonte: adaptado de Mishra, Bhatia e Maity (2019)

Noor-E-Khuda e Albermani (2019) correlacionaram VPU e resistência à compressão e resistência a flexão (ensaio de 3 pontos) de blocos cerâmicos. Foram avaliados 9 tipos de bloco, sendo 4 tipos de construções antigas (idade entre 25 e 50 anos) demolidas e 5 tipos encontrados no mercado australiano; os ensaios de VPU foram realizados nas três direções. Os autores concluíram que, em média, os valores de VPU foram 26% superiores nos blocos novos e que estes apresentaram menor anisotropia. As correlações entre VPU e resistência foram calculadas

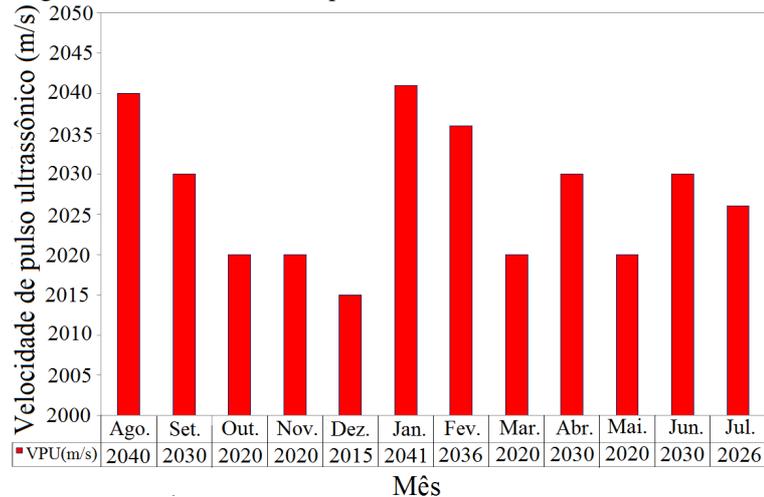
considerando a VPU medida na direção da tensão. Ou seja, a resistência à compressão foi relacionada à VPU medida na altura do bloco (Figura 2.16a) e a resistência à flexão foi relacionada à VPU medida no comprimento (Figura 2.16b).



Isik, Halifeoglu e Ipek (2020) utilizaram ENDs para verificar a danificação em muros e portões da cidade de Diyarbakir, na Turquia, construídos com alvenaria de blocos de basalto. Ao longo de um ano, os autores utilizaram o ensaio de VPU para verificação da abertura de fissuras e qualidade do bloco; e georadar para avaliar a integridade da fundação da estrutura. Verificou-se que só ocorreu aumento na abertura de fissuras em regiões próximas aos portões com intenso tráfego de veículos, com a abertura se mantendo constante em regiões de carregamento estático. Entretanto, segundo os autores, a velocidade medida nos blocos (Figura 2.17) foi inferior aos valores médios encontrados na literatura. Imagens de radar não indicaram a recalques ou danificação significativa na fundação dos muros.

Poucos trabalhos abordam o estudo da acustoelasticidade em alvenaria. Buscando as palavras-chave “masonry” e “acoustoelastic effect” na base Web of Science, no período entre 1900 e 2022, apenas duas publicações são encontradas. Os dois artigos (JASINSKI, 2020; JASINSKI, STEBEL e KIELAN, 2021), assim como um outro trabalho não listado pelo Web of Science (MANNING, RAMOS e FERNANDES, 2014) serão descritos a seguir.

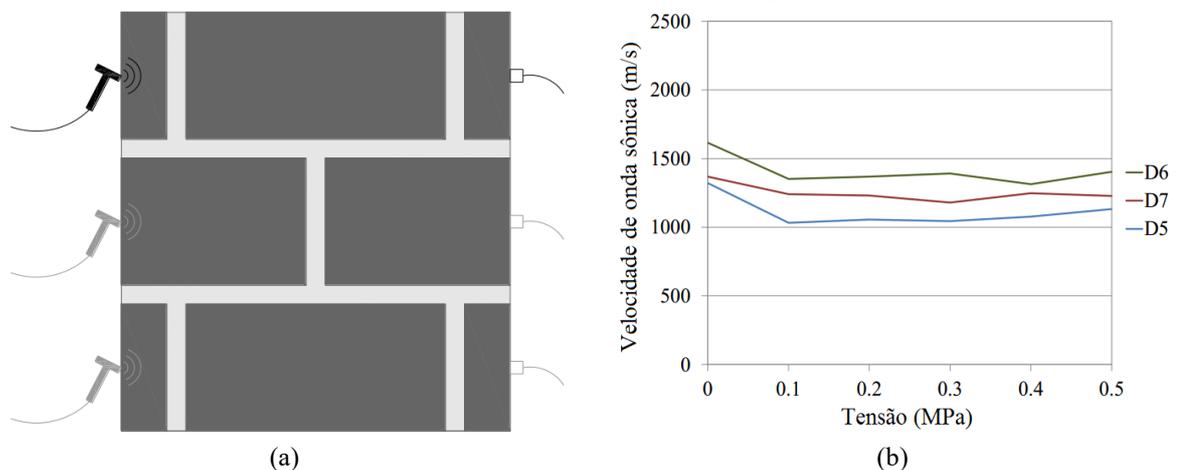
Figura 2.17 – Velocidade de pulso ultrassônico nos blocos de basalto



Fonte: adaptado de Isik, Halifeoglu e Ipek (2020)

Manning, Ramos e Fernandes (2014) analisaram a variação de velocidade de ondas sônicas e ultrassônicas em elementos de alvenaria submetidos a compressão, embora os autores não mencionem a teoria da acustoelasticidade. As unidades utilizadas para a fabricação dos elementos de alvenaria foram blocos maciços de granito. Os autores realizaram ensaios de velocidade de pulso ultrassônico em cubos de granito e de argamassa e, no entanto, observaram o efeito acustoelástico apenas no granito. Os pesquisadores atribuíram a dificuldade de observação do efeito acustoelástico na argamassa à baixa resistência à compressão do material (0,32 MPa) que não permitiu que um carregamento considerável fosse aplicado. As pequenas paredes analisadas neste trabalho foram construídas com dimensões de 600 mm x 200 mm x 660 mm (altura). A avaliação da acustoelasticidade nestas paredes foi realizada por meio de testes sônicos. A configuração do ensaio e os resultados obtidos são mostrados na Figura 2.18.

Figura 2.18 – Trabalho de Manning, Ramos e Fernandes (2014): (a) configuração do ensaio em paredes e (b) velocidade sônica em função da tensão aplicada



Fonte: adaptado de Manning, Ramos e Fernandes (2014)

Como mostra a Figura 2.18b, não é possível observar um aumento da velocidade com a tensão aplicada. Os autores discutiram possíveis razões para este comportamento. A primeira ponderação a ser feita é a da baixa tensão aplicada durante a avaliação do efeito acustoelástico. A resistência à compressão das paredes não foi determinada, embora os autores afirmem que é superior a 4,167 MPa. Portanto, durante o ensaio sônico, a máxima tensão aplicada correspondeu a menos de 12% da resistência da peça. Os autores também comentam que o aparelho utilizado para a realização dos ensaios fornecia apenas o tempo de chegada da onda e não o sinal captado para que uma análise mais detalhada pudesse ser realizada. Por fim, os autores mencionam que, quando a compressão é aplicada sobre a peça, ocorre uma deformação de tração na direção de propagação da onda estudada. Portanto, essa diminuição da velocidade poderia ser decorrente do aumento da trajetória percorrida.

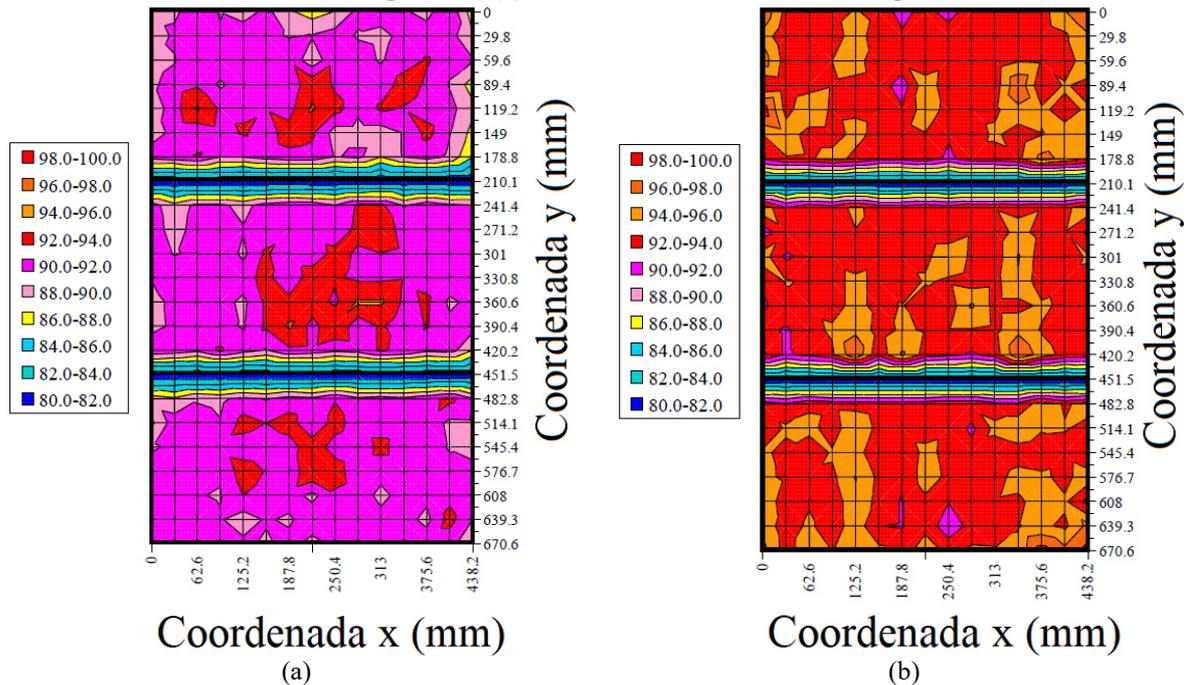
Embora os resultados apresentados por Manning, Ramos e Fernandes (2014) não permitam a observação do efeito acustoelástico em paredes, este trabalho apresenta algumas discussões relevantes. Na Figura 2.18b, os autores mostram que o ensaio na altura intermediária (D6), que tem apenas uma camada de argamassa apresentou velocidade de propagação superior às alturas em que a onda se propagou através de duas camadas. Este resultado mostra a vantagem de evitar as camadas de argamassa durante o ensaio ultrassônico. Outro resultado importante destacado pelos pesquisadores é a deformação de tração desenvolvida pela parede na direção transversal ao carregamento. Embora os autores atribuam a diminuição de velocidade ao aumento da trajetória, é possível que este resultado esteja relacionado ao desenvolvimento de tensões de tração nesta direção. Na alvenaria, esta tensão de tração desenvolvida é resistida pela aderência da interface bloco-argamassa. Neste caso, é possível que, a nível microscópico, tenha havido uma separação ou um afastamento na interface que tenha ocasionado uma camada de ar e diminuído a velocidade de propagação da onda sônica. Novamente, seria interessante observar se esse comportamento se repete quando observado sem a propagação da onda através da interface.

Jasinski (2020) investigou o efeito acustoelástico em blocos e prismas de concreto celular autoclavado. Segundo o autor, este material foi escolhido como objeto de estudo por ser mais homogêneo que o concreto comum e por ser muito usado na construção civil na Europa. Os ensaios foram realizados com transdutores exponenciais de frequência 54 kHz.

O autor estudou inicialmente o comportamento de blocos, chegando a um equacionamento do coeficiente acustoelástico relativo, dado pelo coeficiente acustoelástico multiplicado pela tensão máxima aplicada no elemento. Além disso, o autor definiu equações para o coeficiente acustoelástico em função da densidade e da umidade relativa do bloco. No

entanto, o autor encontrou um comportamento acustoelástico diferente do concreto convencional para os blocos estudados, com coeficientes negativos, indicando que a velocidade de propagação no material diminuiu com a aplicação de tensão. A Figura 2.19 mostra o aumento no tempo de propagação medido em prismas sem tensão aplicada e com uma compressão equivalente a 50% da tensão de ruptura.

Figura 2.19 – Tempo de propagação medido em prismas de concreto celular autoclavado, medidas em μs : (a) sem tensão aplicada e (b) submetidos a 50% da tensão de ruptura



Fonte: Jasinski (2020)

Por fim, Jasinski (2020) aplicou as relações definidas nos blocos para estimar as tensões em prismas de três blocos submetidos a 25%, 50% e 75% da tensão de ruptura. Segundo o autor, a diferença máxima encontrada entre a tensão estimada a partir dos coeficientes acustoelásticos experimentais e a tensão estimada por meio de uma simulação numérica tridimensional foi de 28%.

Jasinski, Stebel e Kielan (2021) utilizaram a mesma abordagem de Jasinski (2020) para estimar tensões em prismas de concreto celular autoclavado. Entretanto, neste trabalho, os autores determinaram os coeficientes acustoelásticos em blocos submetidos a um estado biaxial de tensões, com consideração da densidade e umidade relativa dos blocos. Uma vez determinados os coeficientes acustoelásticos nos blocos, estes foram aplicados às medidas experimentais de ultrassom obtidas nos prismas e comparados às tensões desenvolvidas em uma simulação numérica em elementos finitos. Assim como em Jasinski (2020), os autores encontraram coeficientes acustoelásticos negativos e foram encontradas diferenças superiores

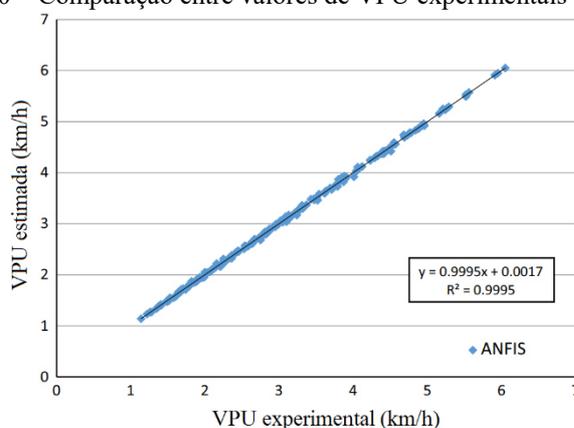
a 30% entre as obtidas experimental e numericamente para níveis de tensão aplicada elevados (75% da tensão de ruptura).

2.5 Modelagem de Velocidade de Pulso Ultrassônico

A simulação de ensaios experimentais pode ser utilizada para realização de análises paramétricas ou para esclarecer o comportamento do material durante o experimento. Esta seção aborda brevemente alguns trabalhos que envolvem a simulação do ensaio de VPU por meio de diferentes técnicas computacionais.

Motamedi et al. (2015) utilizaram um sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo (ANFIS) para prever a velocidade de pulso ultrassônico de blocos de concreto com adição de turfa. Para tanto, os autores realizaram inicialmente um programa experimental em que foram avaliadas a resistência e a VPU de 144 cubos deste material com variação de quatro parâmetros: quantidade de cimento, quantidade de turfa, quantidade de areia e tempo de cura da amostra. Estes quatro parâmetros foram utilizados como variáveis no modelo numérico e os autores encontraram uma boa correlação entre os valores estimados e os valores medidos experimentalmente, conforme mostrado na Figura 2.20.

Figura 2.20 – Comparação entre valores de VPU experimentais e numéricos

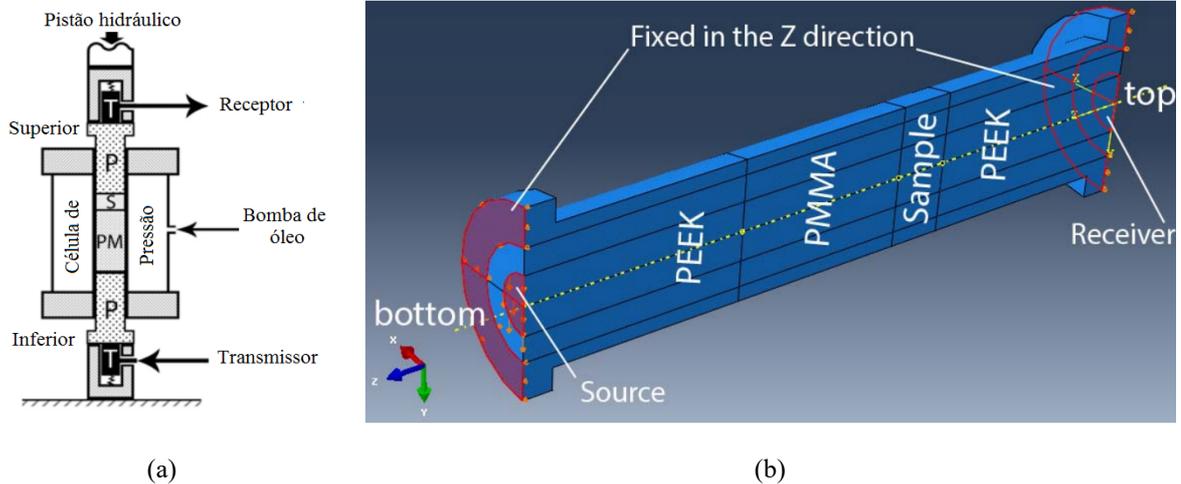


Fonte: adaptado de Motamedi et al. (2015)

Yurikov, Lebedev e Pervukhina (2016) simularam ensaios de Velocidade de Pulso Ultrassônico em cilindros de rocha de pequena altura (inferior a 40 mm). Os autores comentam que o ensaio para avaliação de permissividade dielétrica em rochas é realizado em discos de altura reduzida e que, enquanto seria de interesse dos pesquisadores que essas amostras de tamanho reduzido também pudessem ser utilizada para ensaios de VPU, existem dúvidas quanto à validade deste ensaio. Os autores simularam um ensaio de VPU em amostras cilíndricas de rocha de cerca de 15 mm de altura submetida a uma célula de pressão a fim de simular a

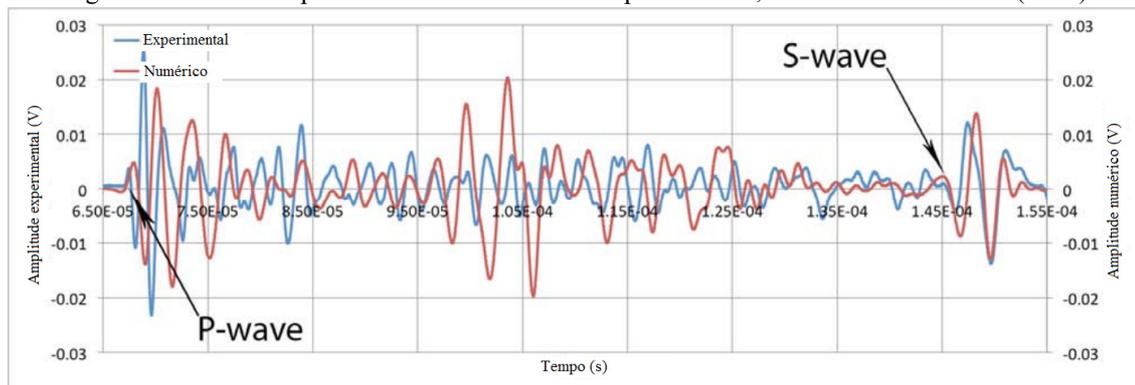
condição da rocha in-situ (Figura 2.21) e obtiveram o sinal recuperado pela simulação similar ao obtido experimentalmente (Figura 2.22).

Figura 2.21 – Simulação de Yurikov, Lebedev e Pervukhina (2016): (a) experimento realizado e (b) modelo desenvolvido



Fonte: adaptado de Yurikov, Lebedev e Pervukhina (2016)

Figura 2.22 – Sinal experimental e numérico obtido por Yurikov, Lebedev e Pervukhina (2016)



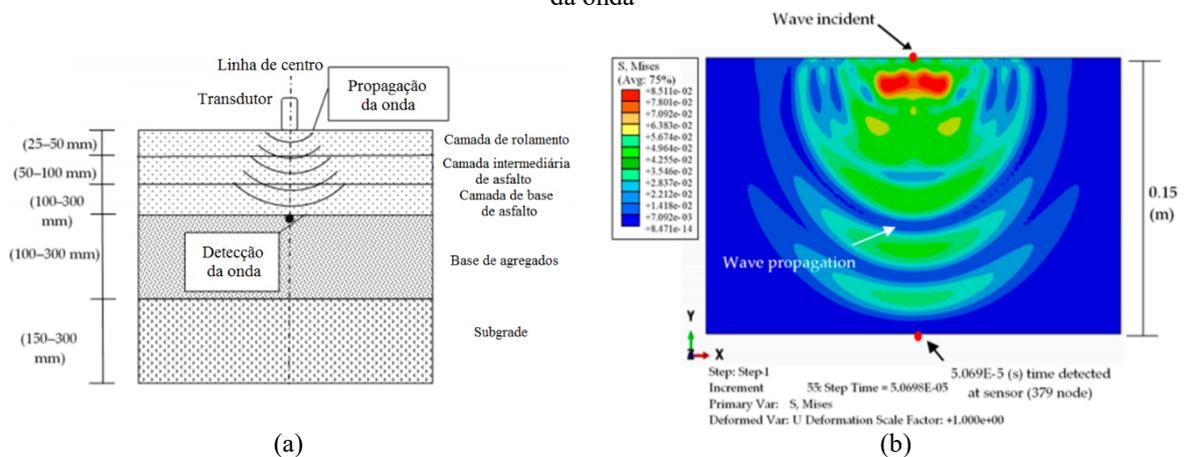
Fonte: adaptado de Yurikov, Lebedev e Pervukhina (2016)

Yurikov, Lebedev e Pervukhina (2016) utilizaram a simetria do ensaio para reduzir o modelo pela metade. A aplicação da onda foi feita por meio de deslocamentos na direção y do modelo, considerando o sistema de coordenadas mostrado na Figura 2.22. A amplitude do deslocamento imposto variou de acordo com a amplitude do sinal emitido durante o experimento. Os autores demonstraram também que, apesar do modelo ter as superfícies superior e inferior travadas na direção z e do deslocamento aplicado unicamente na direção y , ocorreu deslocamento nos elementos do modelo nesta direção. Esta observação confirma que o deslocamento aplicado é compatível com as ondas transmitidas pelos transdutores de ondas de cisalhamento utilizados experimentalmente, que emitem também ondas longitudinais.

Yurikov, Lebedev e Pervukhina (2016) destacaram a importância da escolha do tamanho do elemento finito. Segundo os autores, a propagação da onda mecânica só pode ser simulada se os elementos tiverem dimensões variando entre um quinto e um décimo do comprimento de onda. Os autores adotaram elementos de tamanhos variando entre 0,1 e 0,5 mm, enquanto o comprimento de onda simulado foi de 1,4 mm.

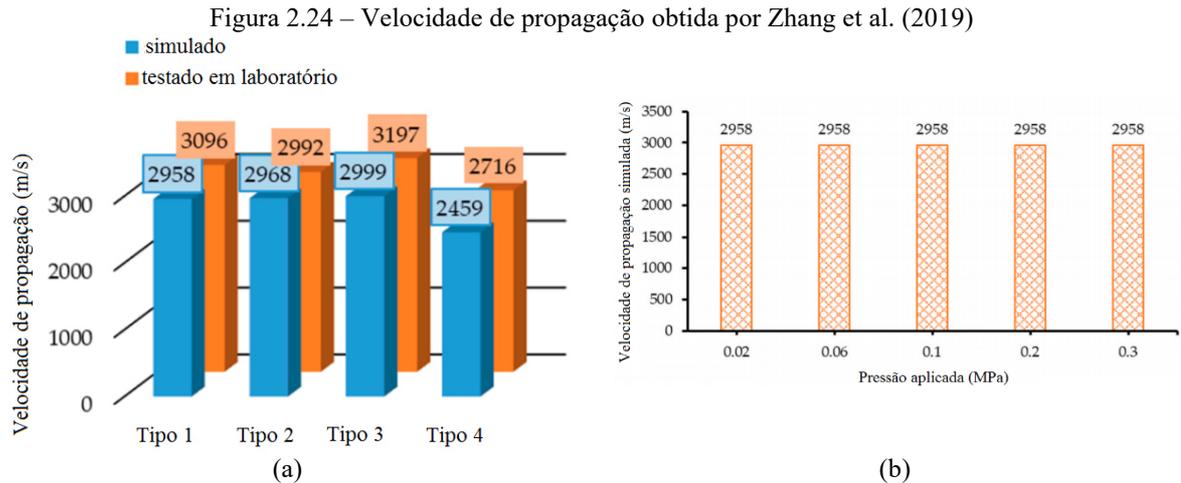
Zhang et al. (2019) simularam o ensaio de VPU em amostras de quatro tipos de concreto asfáltico a fim de avaliar a capacidade da modelo de prever o módulo dinâmico e a presença de fissuras. Os autores afirmam que são necessários pelo menos sete elementos por comprimento de onda para gerar uma simulação satisfatória da propagação da onda. No entanto, foram adotados 20 elementos por comprimento de onda após a realização de uma análise de sensibilidade do modelo. Sobre o modelo, o artigo apresenta apenas a configuração do experimento (Figura 2.23a) e a distribuição da tensão de Von Mises no modelo representando a propagação da onda (Figura 2.23b). A simulação do ensaio foi realizada com a aplicação de uma tensão baixa, da ordem de 0,1 MPa, no ponto de incidência da onda.

Figura 2.23 – Modelo simulado por Zhang et al. (2019): (a) esquema do experimento realizado e (b) propagação da onda



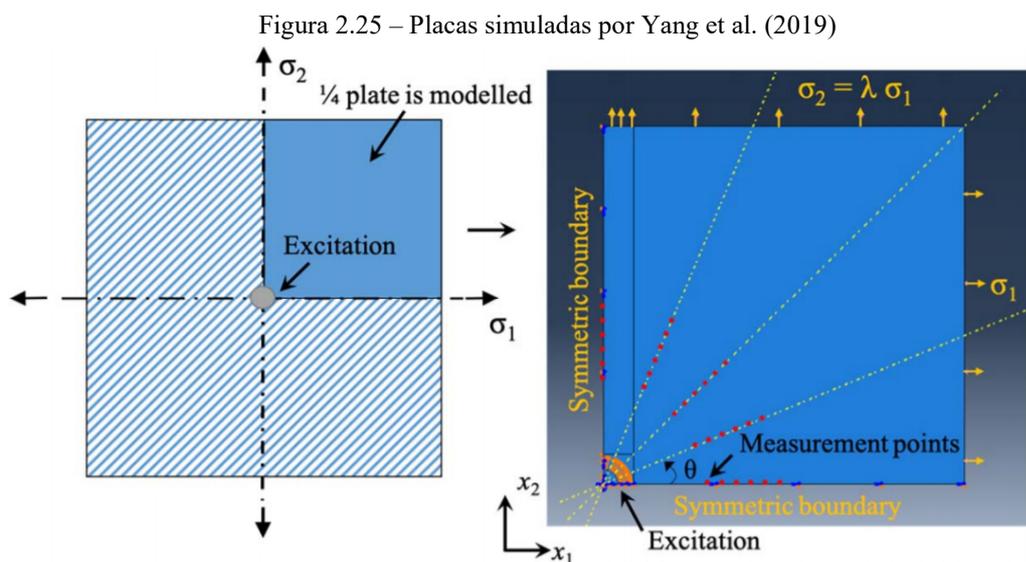
Fonte: adaptado de Zhang et al. (2019)

Para validar o modelo, os autores compararam a velocidade de propagação obtida experimentalmente e por meio do modelo numérico (Figura 2.24a) e encontraram erro de no máximo 10% para os quatro tipos de concreto asfáltico avaliado, indicando a adequação da metodologia de simulação. Zhang et al. (2019) realizaram ainda uma análise de sensibilidade variando a tensão aplicada para geração da onda mecânica e observando o impacto desta variação sobre a velocidade de propagação medida (Figura 2.24b). A alteração da pressão não significou alteração na velocidade.



Fonte: adaptado de Zhang et al. (2019)

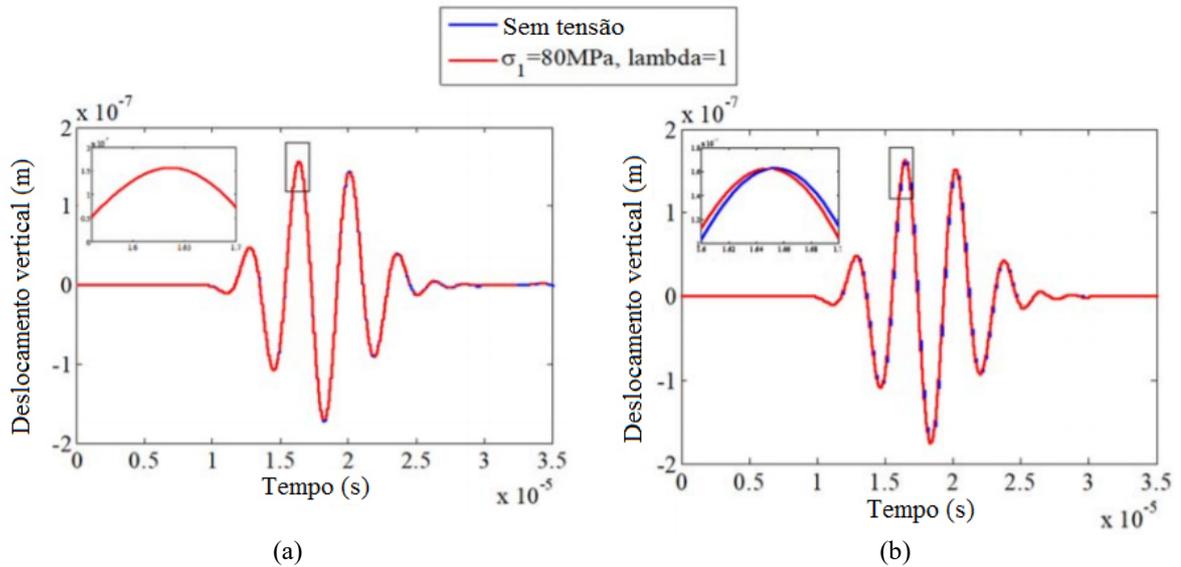
Yang et al. (2019) simulou a propagação de ondas Lamb em placas de alumínio a fim de avaliar a variação causada pelo efeito acustoelástico quando submetidas a estados biaxiais de tensão e a flexão. Para tanto, os autores implementaram as equações desenvolvidas por Murnaghan (1937) ao modelo constitutivo do material e o resultado obtido foi comparado ao modelo teórico desenvolvido por Mohabuth et al. (2016). As placas foram simuladas por meio de elementos tridimensionais e, devido à simetria do modelo, representou-se apenas um quarto da placa, conforme mostrado na Figura 2.25. Os elementos foram simulados com 0,25 mm de lado, de modo que um comprimento de onda correspondesse a 20 elementos.



A Figura 2.26 mostra a diferença entre os sinais obtido com o modelo linear (Figura 2.26a) e o modelo não-linear com a implementação das equações de Murnaghan (1937) (Figura 2.26b). Uma vez que o efeito acustoelástico decorre da não-linearidade geométrica e da presença

de constantes elásticas de terceira ordem na equação constitutiva do material, os autores evidenciam a necessidade da implementação do modelo teórico para a representação do fenômeno.

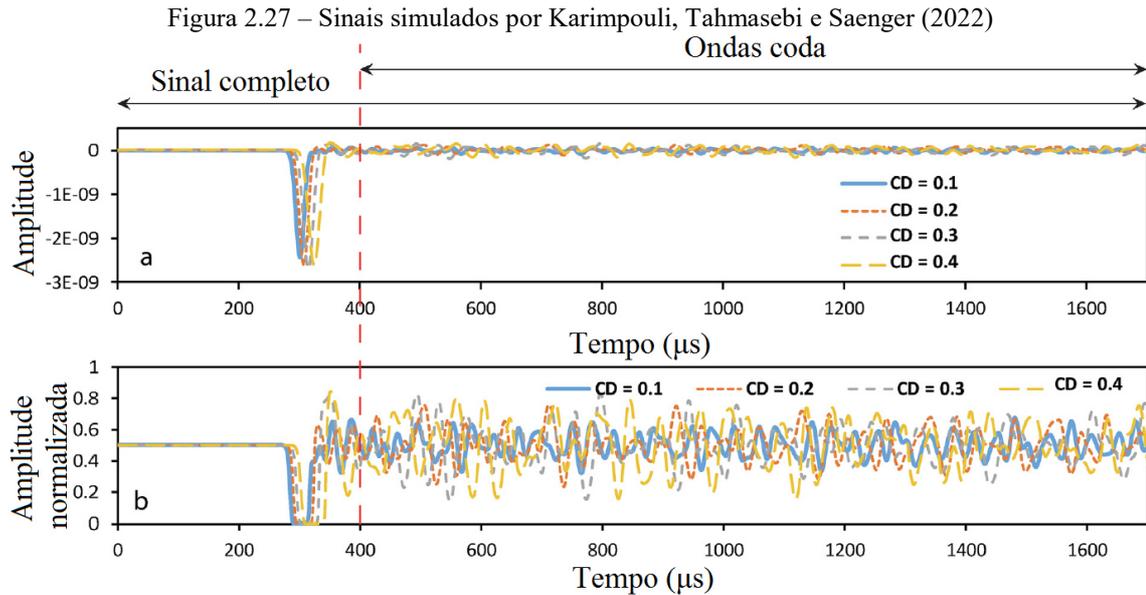
Figura 2.26 – Ondas obtidas por Yang et al. (2019): (a) modelo linear e (b) modelo não-linear



Fonte: adaptado de Yang et al. (2019)

Karimpouli, Tahmasebi e Saenger (2022) utilizaram um algoritmo de diferenças finitas para simular sinais obtidos em ensaios de VPU para estimar a densidade de fissura em rochas utilizando duas técnicas de aprendizado de máquina, redes neurais convolucionais (*Convolutional Neural Networks – CNN*) e redes de “long short-term memory” (LSTM). Para este estudo, os autores variaram o comprimento de onda dos pulsos, a densidade de fissuras e a dimensão das fissuras. Os sinais simulados são mostrados na Figura 2.27 para seções com diferentes densidades de fissura (*crack density*, ou CD).

Utilizando diferenças finitas, os autores geraram sinais de ondas diretas, ondas coda e ondas refletidas (referentes ao ensaio de eco-pulso) e realizaram 10000 simulações variando a proporção comprimento de onda/comprimento de fissura (CO/CF). Os autores concluíram que haviam intervalos ótimos para o coeficiente CO/CF para a estimativa de densidade de fissuras e que estes intervalos variam de acordo com o tipo de onda. Além disso, os autores concluíram que ondas diretas e refletidas geraram resultados melhores que as ondas coda nesta avaliação.



Fonte: adaptado de Karimpouli, Tahmasebi e Saenger (2022)

2.6 Resumo do capítulo

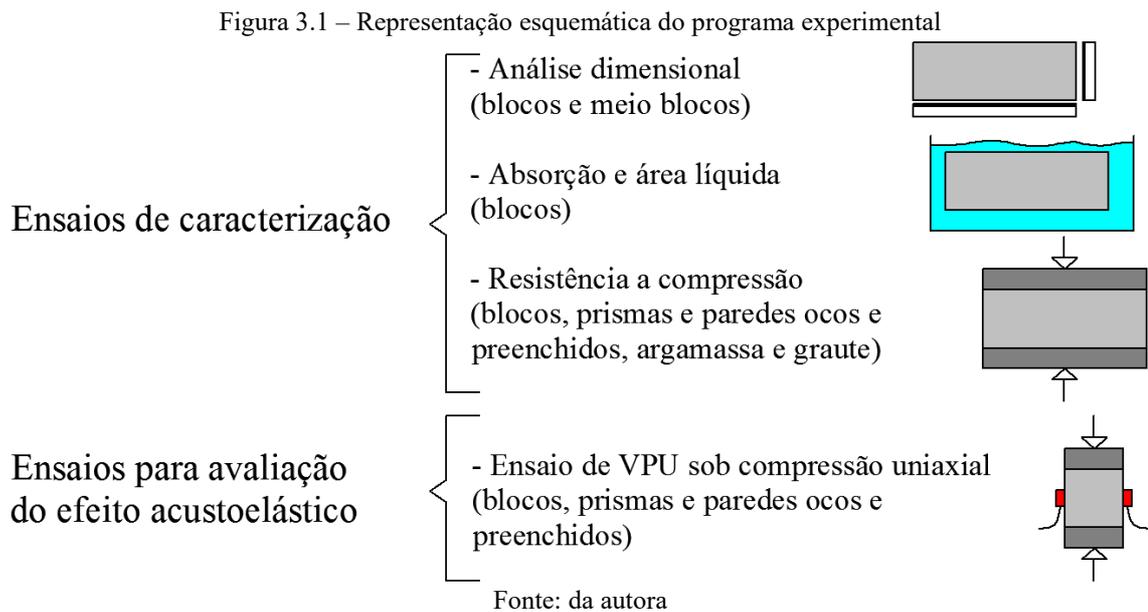
Neste capítulo, foram apresentados brevemente os fundamentos teóricos do ensaio de VPU e da acustoelasticidade, assim como o estado da arte de pesquisas com acustoelasticidade em estruturas, ensaios não destrutivos em alvenaria, e simulações numéricas do ensaio de VPU.

A revisão de trabalhos experimentais que abordam a acustoelasticidade evidenciou a escassez de pesquisas publicadas sobre o efeito acustoelástico em elementos de alvenaria. Além disso, os artigos encontrados mostravam resultados referentes a materiais pouco usuais no mercado brasileiro, e.g., Manning, Ramos e Fernandes (2014) avaliaram blocos maciços de granito, Jasinski (2020) e Jasinski, Stebel e Kielan (2021) investigaram blocos e prismas de concreto celular autoclavado.

A partir da revisão da literatura referente a ensaios não destrutivos em alvenaria, os autores foram unânimes em afirmar que a atenuação provocada pela interface entre bloco e argamassa consistia em uma dificuldade do ensaio e que, por vezes, impossibilitava a avaliação. Em decorrência disso, este programa experimental foi planejado apenas com ensaios em arranjo direto, a fim de evitar a camada de argamassa.

3. Metodologia do programa experimental

O presente capítulo descreve a metodologia do programa experimental realizado no Laboratório de Estruturas (LE-EESC). O programa experimental se dividiu em duas etapas: caracterização dos materiais e da alvenaria e ensaios para avaliação do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria. Uma representação esquemática do programa experimental é mostrada na Figura 3.1.



Todos os blocos utilizados nesta pesquisa foram doados pela empresa Tatu Pré-moldados, sediada em Limeira-SP.

3.1 Análise dimensional dos blocos

A fim de caracterizar os blocos, foram realizados ensaios de análise dimensional conforme descrito pela ABNT NBR 12118:2013. A quantidade de blocos ensaiados (seis) foi determinada pela ABNT NBR 6136:2016.

A análise dimensional consiste em determinar as dimensões do bloco. Para determinação do comprimento, largura, altura e dimensões dos furos do bloco, utilizou-se uma régua metálica com resolução de 1 mm. Para a análise das três primeiras grandezas, foram realizadas três medidas na face de maior espessura do bloco para cada dimensão analisada (Figura 3.2a). A medida das dimensões do furo do bloco foi realizada apenas duas vezes por furo, sendo uma no sentido longitudinal e outra no sentido transversal. Esta medida também foi realizada na face de maior espessura do bloco. A medida das espessuras das paredes foi feita

com um paquímetro de resolução de 0,01 mm. Foram efetuadas duas medidas em paredes longitudinais e uma medida em cada parede transversal, sendo realizadas sempre no ponto mais estreito da parede e na face de menor espessura (Figura 3.2b).

Figura 3.2 – Análise dimensional dos blocos: (a) mensuração de comprimentos e (b) mensuração de espessura



Fonte: da autora

A partir das dimensões dos blocos, foram determinadas as suas espessuras equivalentes mínimas e_{eq} , que são dadas pela relação entre a soma das espessuras de todas as paredes transversais em milímetros e o comprimento do bloco em metros. Determinou-se ainda a área bruta dos blocos, que é dada pelo produto entre comprimento e largura, desprezando-se a presença dos furos.

Além dos blocos, foi necessário realizar-se também a análise dimensional dos meio blocos. Os procedimentos e a aparelhagem utilizada foram os mesmos listados para a realização dos ensaios em blocos inteiros.

Por fim, para determinar a aceitação dos blocos, utiliza-se a ABNT NBR 6136:2016, que indica os parâmetros de tolerância para as medidas do bloco e meio-bloco a partir de suas dimensões nominais. A aprovação da largura, comprimento e altura é feita a partir da comparação dos valores medidos com os valores nominais. Já as dimensões do furo e espessura das paredes, por não terem valores nominais, devem obedecer a medidas mínimas indicadas em norma. Os critérios de aceitação para blocos de classe A, ou seja, com f_{bk} maior que 8 MPa, são mostrados na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Critérios de aceitação de largura, comprimento e altura dos blocos (mm)

Elemento	Dimensão	Nominal	Tolerância
Bloco	Largura	140	2,0
	Comprimento	390	3,0
	Altura	190	3,0
Meio bloco	Largura	140	2,0
	Comprimento	190	3,0
	Altura	190	3,0

Fonte: ABNT NBR 6136:2016

Tabela 3.2 – Critérios de aceitação de espessura de paredes do bloco (mm)

Dimensão	Mínimo
Paredes longitudinais	25
Paredes transversais	25
Espessura equivalente	188
Menor dimensão do furo	70

Fonte: ABNT NBR 6136:2016

3.2 Absorção e área líquida dos blocos

Os ensaios para determinação da absorção e da área líquida dos blocos foram realizados de acordo com o procedimento descrito pela ABNT NBR 12118:2013. A quantidade de blocos ensaiados para determinação da área líquida (três) foi determinada a partir da ABNT NBR 6136:2016.

Para determinação de absorção de água e área líquida dos blocos, foram utilizadas uma balança com dispositivo para pesagem hidrostática com resolução de 0,1 g e uma estufa capaz de manter a temperatura no intervalo de (110 ± 5) °C.

Este ensaio foi composto por duas etapas: uma de secagem e outra de saturação. A etapa de secagem consistiu em manter as amostras em estufa durante 24 h. Após esse período, as amostras foram retiradas e levadas à balança. Uma vez pesadas, as amostras retornaram para a estufa e suas massas foram medidas novamente após 2 horas. Esta operação se repetiu a cada duas horas até que a variação de massa fosse inferior a 0,5 % em relação ao seu valor anterior. Uma vez obtido este valor, a massa atingida foi denominada massa seca m_1 da amostra.

Após a obtenção da massa seca, as amostras foram deixadas em temperatura ambiente para resfriar. Uma vez em temperatura ambiente, as amostras foram imersas em água por 24 h. Decorrido este tempo, a massa aparente m_3 do corpo de prova foi obtida por meio da balança

hidrostática com o bloco ainda imerso (Figura 3.3). Por fim, foi determinada a massa do bloco m_2 em condição saturada com superfície seca.

Figura 3.3 – Pesagem hidrostática do bloco



Fonte: da autora

A absorção e a área líquida foram calculadas a partir da Equação (3.1) e da Equação (3.2), encontradas na ABNT NBR 12118:2013. Na Equação (3.2), h se refere à altura média do bloco, conforme determinada por meio da análise dimensional e γ corresponde à massa específica da água.

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3.1)$$

$$A_{liq} = \frac{m_2 - m_3}{h \times \gamma} \times 10000 \quad (3.2)$$

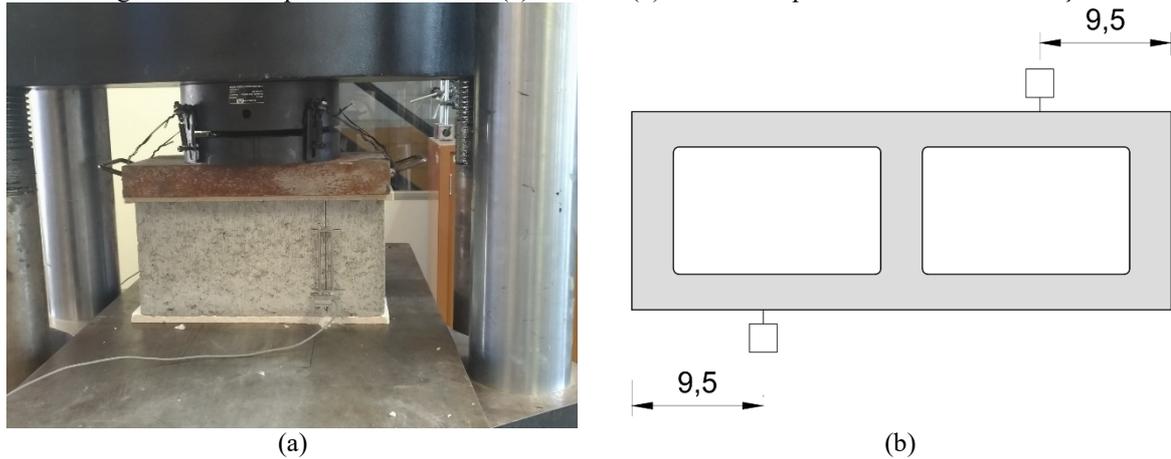
Para blocos de classe A, feitos com agregado normal, a ABNT NBR 6136:2016 indica como absorção máxima aceitável o valor de 8% para a média e 9% para o bloco individual.

3.3 Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos blocos

A determinação da resistência à compressão dos blocos foi realizada conforme a ABNT NBR 12118:2013. O ensaio de resistência à compressão foi realizado com aplicação do carregamento por meio do controle do deslocamento do pistão da máquina a uma velocidade

de 0,01 mm/s. A instrumentação dos blocos foi realizada por meio de dois transdutores do tipo clip-gage colados em dois lados opostos do corpo de prova e cada transdutor foi posicionado no centro de um dos furos do bloco, conforme mostrados na Figura 3.4a do ensaio realizado e na Figura 3.4b do esquema de instrumentação. Os transdutores foram instalados de modo a detectar o deslocamento entre pontos a uma distância de 10 cm.

Figura 3.4 – Compressão dos blocos: (a) ensaio e (b) desenho esquemático da instrumentação



Fonte: da autora

A fim de evitar a necessidade de retificação dos blocos, posicionou-se uma placa de forro de fibra mineral nas faces superior e inferior do corpo de prova. Esta placa tem a função de se adequar aos defeitos superficiais do bloco e evitar concentrações de tensões. A resistência da placa é desprezível frente à resistência do bloco e, portanto, sua utilização não altera o comportamento mecânico do conjunto. Estas placas foram utilizadas em todos os ensaios de resistência à compressão realizados em elementos de alvenaria.

O lote recebido continha 600 blocos e o desvio-padrão da resistência à compressão da fábrica não é conhecido. Portanto, de acordo a ABNT NBR 6136:2016, foram ensaiados 6 blocos para determinação da resistência à compressão característica do bloco, f_{bk} . A partir da resistência obtida em ensaio para os seis blocos, foram utilizadas as Equações (3.3), (3.4) e (3.5) para estimar o valor de f_{bk} . Nas equações, n corresponde à quantidade de blocos ensaiados; $f_{b(1)}$, $f_{b(2)}, \dots, f_{b(i)}$ à resistência à compressão individual dos blocos organizada de forma crescente; e ψ é um coeficiente que reflete a confiabilidade do ensaio e depende da quantidade de blocos ensaiados. O valor deste coeficiente é dado pela Tabela 5 da ABNT NBR 6136:2016. No presente trabalho, foram avaliados seis blocos e o valor de ψ corresponde a 0,89.

$$f_{bk,est} = 2 \left[\frac{f_{b(1)} + f_{b(2)} + \dots + f_{b(i-1)}}{i-1} \right] - f_{bi} \quad (3.3)$$

$$i = \frac{n}{2}, \text{ sendo } n \text{ par} \quad (3.4)$$

$$f_{bk,est} \geq \psi \cdot f_{b(1)} \quad (3.5)$$

A partir do ensaio de compressão, foi possível calcular o módulo de deformação, E_p , do bloco. Este foi calculado a partir da indicação da ABNT NBR 15961-2:2011 para a determinação do módulo de deformação de prismas e considerado igual à inclinação da reta secante aos pontos da curva tensão-deformação que correspondem a 5% e 30% da tensão de ruptura de cada bloco.

A resistência à compressão dos meio-blocos foi avaliada de modo análogo ao ensaio dos blocos. A instrumentação nestes ensaios consistiu em dois transdutores de deslocamento do tipo clip-gage posicionados no centro dos dois maiores lados do meio-bloco, conforme mostrado na Figura 3.5. Assim como para a determinação da resistência à compressão dos blocos, nesta etapa, foram ensaiados a amostra do lote recebido de 140 meio-blocos consistindo em 6 corpos de prova.

Figura 3.5 – Ensaio de resistência à compressão de um meio-bloco



Fonte: da autora

3.4 Caracterização da argamassa

As argamassas utilizadas neste trabalho foram feitas a partir dos seguintes materiais: cimento Portland composto com escória de classe 32 (CPII-E), da marca Holcim; cal hidratada

do tipo CH-III, da marca Itaú e areia de granulização média, com dimensão máxima característica de 4,75 mm e módulo de finura 2,61, determinados de acordo com as orientações da ABNT NBR NM 248:2003 e ABNT NBR 6502:1995.

Foram testados dois traços de argamassa: 1: 0,5: 4,5 e 1: 0,25: 3, ambos descritos em volume. A fim de obter uma melhor padronização do preparo da argamassa, os traços em volume foram transformados em traços em massa. As massas unitárias utilizadas foram retiradas da literatura, segundo o trabalho de Oliveira (2014). Foram adotados valores determinados previamente uma vez que a investigação das propriedades da argamassa não é o foco principal do trabalho. A relação água/cimento foi determinada a partir de análise visual da trabalhabilidade da argamassa. Estes valores são mostrados na Tabela 3.3.

O índice de consistência corresponde a uma medida de trabalhabilidade da argamassa. A trabalhabilidade é uma das propriedades mais importantes da argamassa, uma vez que esta tem a função de garantir o bom assentamento dos blocos. A determinação do Índice de Consistência foi realizada de acordo com o procedimento estabelecido pela ABNT NBR 13276:2016. A mistura da argamassa foi realizada de acordo com as determinações da ABNT NBR 16541:2016.

Tabela 3.3 – Descrição dos traços de argamassa em volume e em massa

	Cimento	Cal	Areia	Água
Massa unitária (g/cm ³) (Oliveira, 2014)	1,171	0,765	1,665	1
Traço em volume	1	0,5	4,5	1,3
Traço em massa	1	0,33	6,38	1,17
Traço em volume	1	0,25	3	0,85
Traço em massa	1	0,16	4,27	0,85

Fonte: da autora

Para determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade da argamassa utilizada no assentamento, foram moldados seis corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Todos os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 28 dias após a moldagem dos cilindros. Um dia após a moldagem, os cilindros foram retirados das formas e curados em câmara úmida. A regularização dos corpos de prova foi feita por meio de uma máquina retífica.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados com o auxílio de uma máquina de ensaio servo-hidráulica com controle de deslocamento e velocidade de carregamento de 0,01 mm/s. Os cilindros foram instrumentados com dois transdutores de deslocamento do tipo clip-gage, conforme mostrado na Figura 3.6. Estes transdutores mediram o deslocamento entre dois pontos com distância inicial de 10 cm, metade da altura do corpo de prova analisado.

Figura 3.6 – Instrumentação no ensaio de resistência à compressão da argamassa



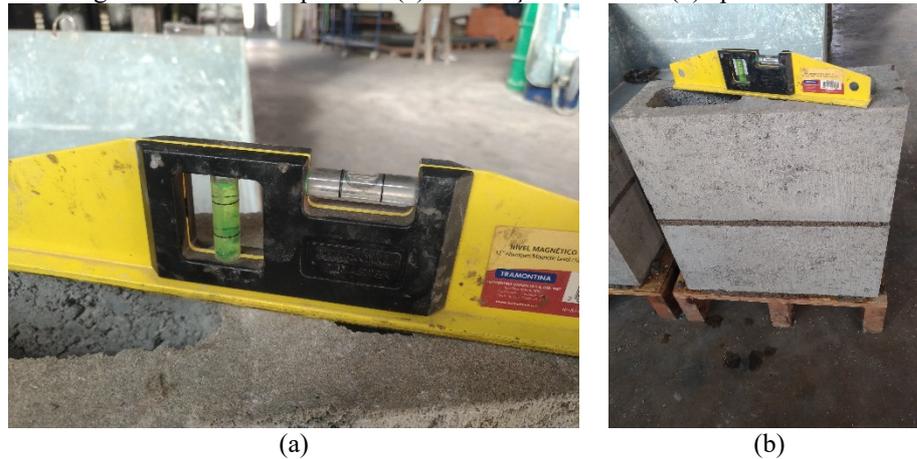
Fonte: da autora

3.5 Caracterização dos prismas ocós

Todos os prismas foram moldados no LE-EESC com a argamassa de traço 1: 0,25: 3 em volume. A pesagem dos materiais foi feita com erro máximo de 50 g, correspondente à resolução da balança. A argamassa foi preparada com o auxílio de um misturador mecânico de capacidade nominal de 250 L. O volume produzido por mistura foi planejado de modo que toda a massa fosse consumida em menos de 2h30min, prazo máximo estipulado pela ABNT NBR 15961-2:2011. Quando necessário, uma pequena quantidade de água foi adicionada à massa para manutenção da consistência ideal, no máximo por duas vezes.

Após o assentamento de cada bloco, foram conferidos o nivelamento com o uso de uma régua de nível e o prumo do conjunto por meio de um prumo de face. Ademais, verificou-se a espessura da junta horizontal de argamassa, que segundo indica a ABNT NBR 15961-2:2011, deve ter espessura de $10 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$. Todos os prismas foram construídos com argamassamento total. Os prismas prontos são mostrados na Figura 3.7 e na Figura 3.8.

Figura 3.7 – Prismas prontos: (a) verificação do nível e (b) aparência final



(a)

(b)

Fonte: da autora

Figura 3.8 – Prismas de: (a) dois blocos e (b) três blocos



(a)

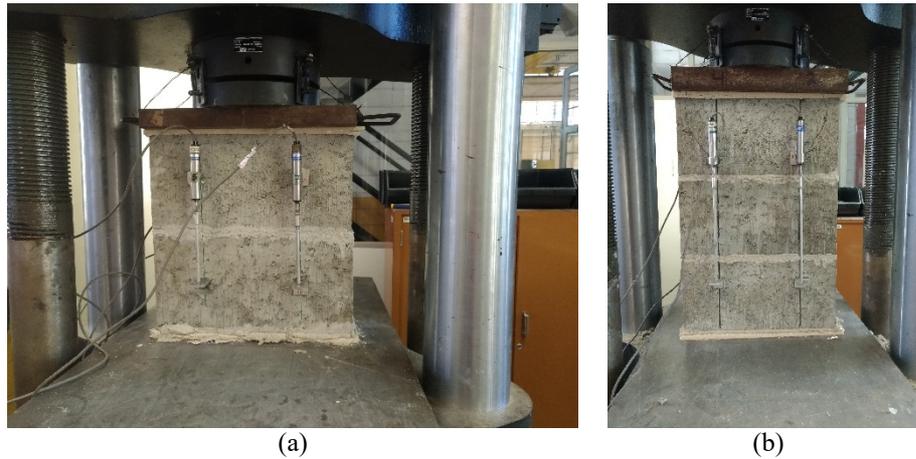
(b)

Fonte: da autora

A cura dos prismas ocorreu no ambiente do laboratório e os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram realizados após 28 dias. Assim como indicado pela ABNT NBR 15961-2:2011, foram ensaiados 12 prismas para determinação destas grandezas. Os ensaios foram realizados por meio de uma máquina servo-hidráulica com controle de deslocamento e a velocidade de carregamento utilizada foi de 0,02 mm/s. Os prismas foram instrumentados com quatro transdutores de deslocamento do tipo LVDT, conforme mostrado na Figura 3.9a e na Figura 3.9b.

A deformação dos prismas foi determinada a partir da média dos deslocamentos marcados pelos quatro transdutores instalados em cada corpo de prova. O módulo de elasticidade apresentado corresponde ao módulo secante aos pontos da curva tensão-deformação em que a tensão é igual a 5% e 30% da máxima suportada pelo prisma, conforme indicado no anexo A da ABNT NBR 15961-2:2011.

Figura 3.9 – Instrumentação dos ensaios de resistência à compressão dos prismas: (a) de dois blocos e (b) de três blocos



Fonte: da autora

3.6 Caracterização das pequenas paredes ocas

Assim como os prismas, todas as pequenas paredes foram moldadas no LE-EESC com a argamassa de traço 1: 0,25: 3 em volume. Foram adotados também os mesmos procedimentos para fabricação e aplicação da argamassa. A cada fiada de blocos assentada, foram conferidos o nivelamento e o prumo da parede, assim como foi verificada se a parede se mantinha retilínea.

Para facilitar a operação de transporte das paredes após o seu assentamento, prismas de concreto armado de dimensões 15 cm x 15 cm x 80 cm (Figura 3.10a) foram feitos a fim de serem adotados como bases. As bases foram moldadas com concreto de f_{ck} 30 MPa e traço em massa 1: 2,14: 2,79, com brita 1 como agregado graúdo e a areia média já utilizada para a mistura de argamassa como agregado miúdo. A relação água/cimento adotada foi de 0,5. Para permitir o içamento das paredes, foram posicionados dois tubos metálicos de 1” de diâmetro a 5 cm das extremidades das bases. A fim de movimentar o conjunto base-parede, barras de aço de 25 mm de diâmetro foram inseridas nestes tubos e a ponte rolante instalada no LE-EESC foi utilizada para o transporte. A fim de suportar os efeitos da flexão gerados pelo peso próprio da base e da parede, foi utilizada armadura dupla na base (Figura 3.10b). Verificou-se que apenas 2 barras de 4,2 mm de diâmetro já seriam suficientes para suportar os esforços solicitantes na base. Entretanto, a armadura dupla foi adotada a fim de melhorar o comportamento da peça na região do tubo, onde há concentração de tensões. Por haver disponibilidade de material no laboratório, foram utilizadas armaduras em tela de 4,2 mm e de 5 mm de diâmetro. As telas foram posicionadas com o auxílio de pedaços de arame recozido.

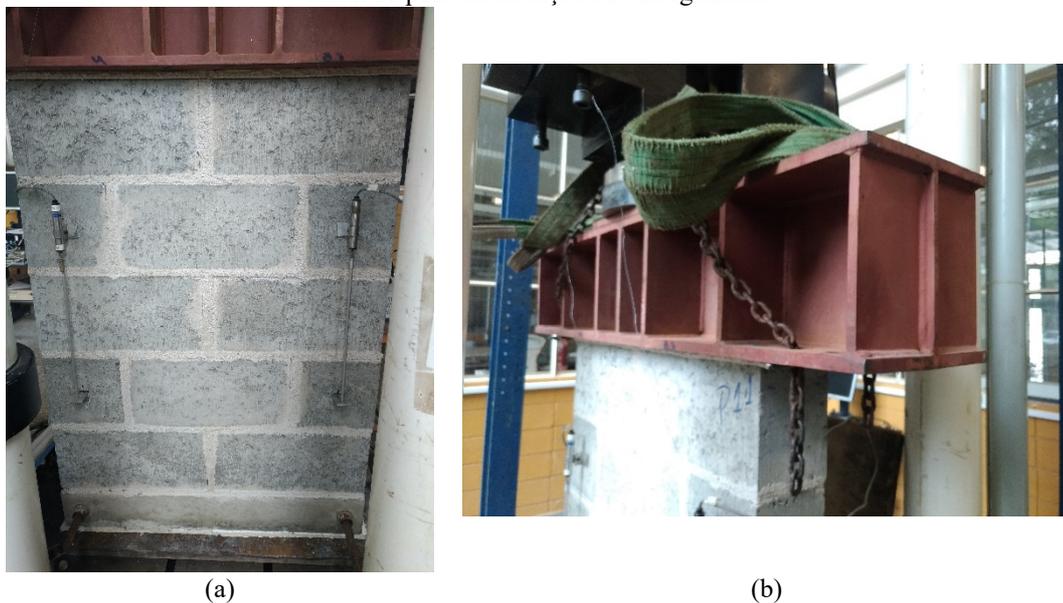
Figura 3.10 – Estrutura para transporte das paredes: (a) base pronta e (b) forma montada



Fonte: da autora

A fim de caracterizar o seu comportamento mecânico, seis pequenas paredes foram submetidas a ensaios de resistência à compressão. Todos os ensaios foram realizados com idades superiores a 28 dias. A instrumentação do ensaio foi realizada com quatro transdutores do tipo LVDT para medir deslocamentos na estrutura. Os transdutores foram posicionados conforme indicado pelo anexo B da ABNT NBR 15961-2:2011 (Figura 3.11a).

Figura 3.11 – Ensaio de resistência à compressão de pequenas paredes: (a) instrumentação e (b) perfil metálico utilizado para distribuição do carregamento



Fonte: da autora

A fim de distribuir o carregamento e evitar concentração de tensões, foi posicionado um perfil metálico (Figura 3.11b) entre a máquina de ensaio e a pequena parede, assim como placas de forro mineral sob a base da parede e entre a amostra e o perfil metálico. Os ensaios foram

realizados em máquina servo-hidráulica com capacidade máxima de 2500 kN. O carregamento foi aplicado por controle de deslocamento do pistão da máquina com velocidade de 0,01 mm/s.

3.7 Caracterização do graute

Para preencher os vazios dos blocos, prismas e pequenas paredes, utilizou-se graute de traço 1: 1,9: 2,21, sendo essa a proporção de cimento, areia e brita 0. O cimento e a areia utilizados para o graute foram os mesmos utilizados na preparação da argamassa. A relação água/cimento adotada foi de 0,55. Utilizou-se ainda aditivo superplastificante do tipo ADVA 585 para melhorar a trabalhabilidade do material na proporção de 0,1% em relação à massa de cimento. A mistura do graute foi feita em misturador mecânico de capacidade nominal de 250 L. Adotou-se como abatimento ideal o valor de 250 mm \pm 20 mm, medido de acordo com a ABNT NBR NM 67:1998 (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Ensaio de abatimento do tronco de cone do graute



Fonte: da autora

Para determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade do graute, foram moldados seis corpos de prova cilíndricos de dimensões ϕ 10 cm x 20 cm de altura. Os cilindros foram deixados em câmara úmida para a cura por 28 dias. Após esse período, foram realizados os ensaios de resistência à compressão em máquina servo-hidráulica. O ensaio foi realizado com controle de deslocamento do pistão e velocidade de carregamento igual a 0,01 mm/s. O f_{ck} do graute foi determinado conforme as indicações da ABNT NBR 12655:2015. A determinação do módulo de elasticidade seguiu a ABNT NBR 8522:2017.

3.8 Caracterização dos elementos preenchidos com graute

Uma vez caracterizados os elementos sem preenchimento e o graute isolado, é necessário realizar as mesmas análises para os elementos grauteados. Todos os prismas foram preenchidos com um intervalo mínimo de 24 horas após o assentamento, intervalo superior ao mínimo necessário de 16 horas segundo a ABNT NBR 15961-2:2011. Todos os elementos foram adensados por meio de uma haste de socamento, com a aplicação de 12 golpes por camada. Os blocos e prismas foram adensados em apenas uma camada; as pequenas paredes foram adensadas em duas camadas. Logo após o preenchimento, os elementos foram cobertos com uma lona plástica a fim de evitar a perda de água. Os blocos preenchidos são mostrados na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Blocos preenchidos



Fonte: da autora

Os ensaios de resistência à compressão de blocos e prismas preenchidos tiveram a mesma instrumentação dos ensaios realizados nos prismas ociosos, conforme mostrado na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Configuração do ensaio de resistência à compressão dos blocos preenchidos com graute

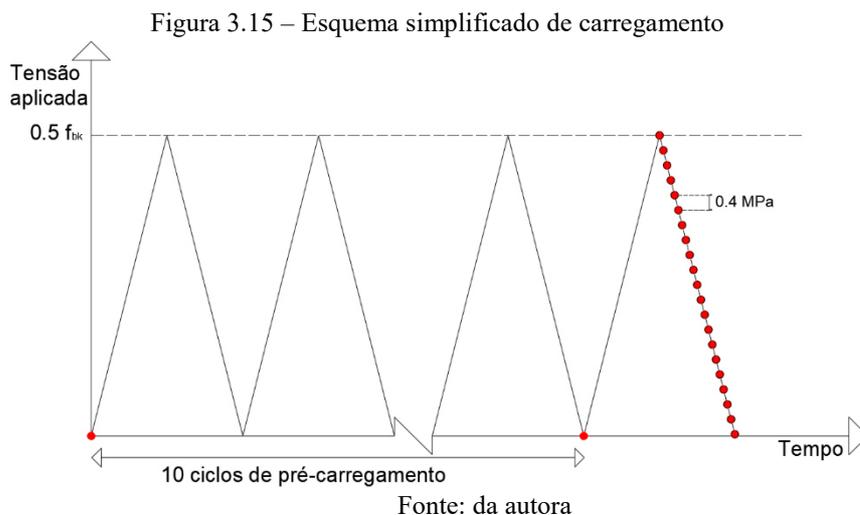


Fonte: da autora

A instrumentação das pequenas paredes preenchidas foi realizada de acordo com o preconizado no anexo B da ABNT NBR 15961-2:2011. Foram utilizados 4 transdutores de deslocamento do tipo LVDT para determinação do módulo de elasticidade dos elementos, com o deslocamento sendo medido ao longo de uma altura de 40 cm.

3.9 Ensaios para avaliação do efeito acustoelástico

Uma vez caracterizados os materiais, iniciou-se a segunda etapa do programa experimental deste trabalho, que correspondeu ao estudo do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria. Para tanto, foi montado um pórtico de reação no LE-EESC e instalados uma bomba manual, um cilindro hidráulico e uma célula de carga para a aplicação da compressão uniaxial sobre os elementos. Um esquema simplificado do carregamento realizado é mostrado na Figura 3.15. Os pontos vermelhos indicam os níveis de tensão em que foi realizado o ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico nas amostras.



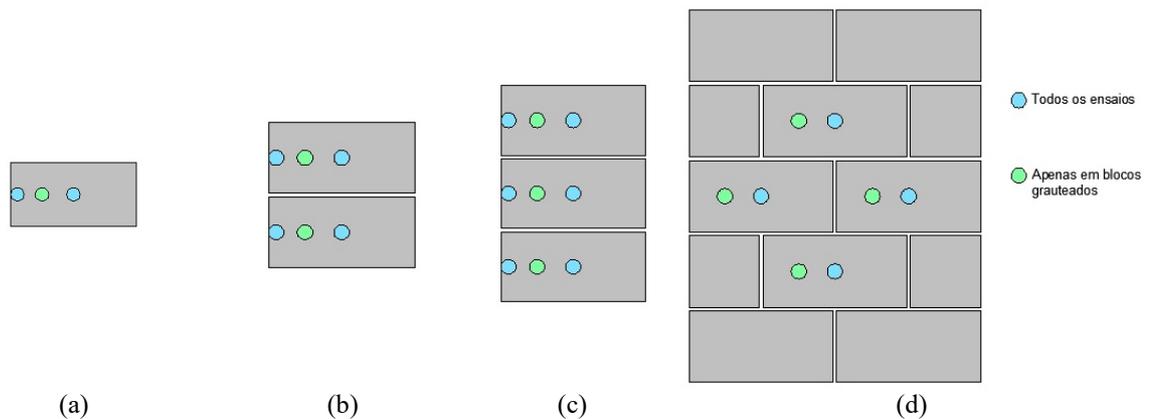
Os dez ciclos de pré-carregamento foram adotados devido aos resultados apresentados por Bompan e Haach (2018). Neste trabalho, os autores mostram que a variação de velocidade ultrassônica em elementos de concreto devido ao efeito acustoelástico tem grande variação nos primeiros ciclos de carregamento e se estabiliza conforme mais ciclos são aplicados. A realização das medidas durante o descarregamento do corpo de prova e posterior comparação da velocidade ultrassônica com o elemento descarregado ao fim do ciclo tem como objetivo diminuir a influência da danificação sobre o resultado obtido. Inicialmente, o carregamento limite seria de 70% do f_{bk} , para evitar que o elemento chegasse à ruptura durante o ensaio. No entanto, durante os ensaios em prismas, observou-se que mesmo com esse limite, os corpos de

prova estavam sofrendo fissuração excessiva e, a fim de evitar que este fenômeno atrapalhasse a passagem do sinal, o limite de carregamento aplicado foi diminuído para 60% e, posteriormente, 50% do f_{pk} .

O intervalo de aproximadamente 0,4 MPa na tensão aplicada corresponde a 20 kN considerando a área nominal bruta do bloco. Este intervalo de 20 kN foi adotado por ser uma diferença de carregamento que pode ser obtida com o aplicador manual. O descarregamento da amostra é feito por meio do afrouxamento na válvula de óleo da bomba manual. Este procedimento gera uma pequena queda instantânea do carregamento aplicado e a velocidade de descarregamento pode ser controlada pelo maior ou menor giro da válvula. Logo, optou-se por adotar um intervalo mínimo de força maior que a queda instantânea de tensão aplicada.

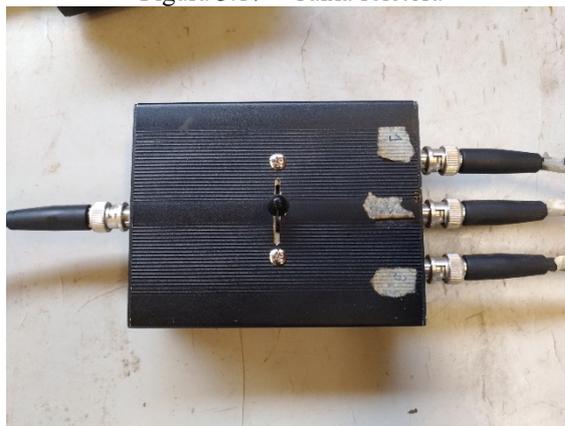
A quantidade de ciclos aplicados após o pré-carregamento variou com a quantidade de pontos ensaiados em cada tipo de elemento (Figura 3.16). Em cada ciclo de carregamento, foi possível avaliar a velocidade de propagação da onda em duas trajetórias, com a utilização de dois pares de transdutores iguais.

Figura 3.16 – Pontos analisados com o ultrassom em: (a) blocos, (b) prismas com dois blocos, (c) prismas com três blocos, (d) pequenas paredes



Para que esses transdutores pudessem permanecer fixos e possibilitar a utilização de dois pares de transdutores em um mesmo ciclo, utilizou-se uma caixa seletora (Figura 3.17), que permite que o sinal recebido seja enviado a um de três outros cabos coaxiais, conforme o posicionamento da chave no equipamento. Logo, quando o nível de carregamento de interesse é atingido, a chave é configurada para emitir e receber a onda por um par de transdutores e, após essa medida, configurada para transmitir a onda pelo outro par de transdutores conectado. Após a gravação do segundo sinal, a tensão aplicada é aliviada até o próximo nível de interesse.

Figura 3.17 – Caixa seletora



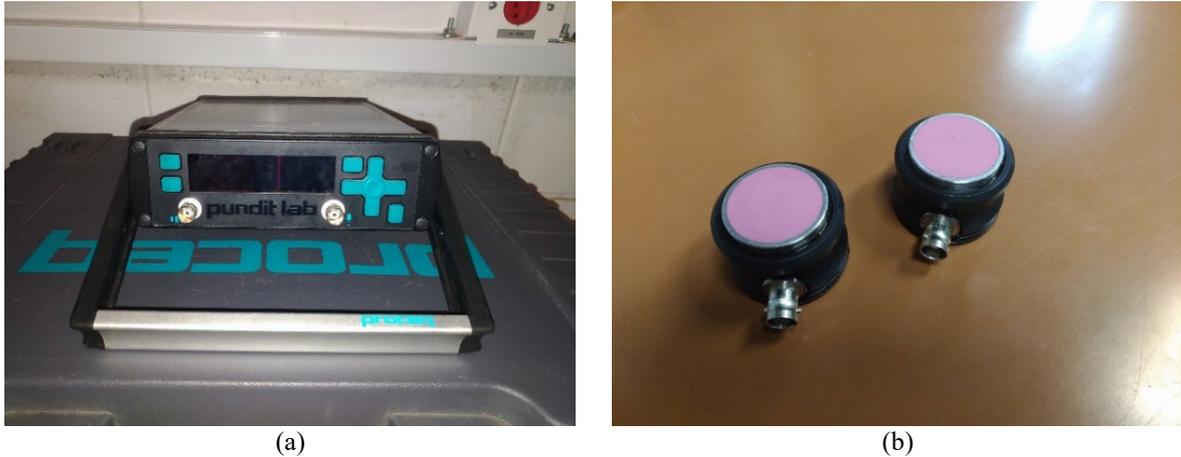
Fonte: da autora

Em todos os elementos, foram avaliadas as ondas transmitidas pelos septos dos blocos. Todos os ensaios de VPU foram realizados com os transdutores em arranjo de transmissão direta. Nas pequenas paredes, optou-se por priorizar os blocos centrais de modo a evitar campos de perturbação de tensões próximos à aplicação do carregamento. Adicionalmente, em elementos preenchidos, foi analisado o ponto central de alguns furos preenchidos. Os ensaios foram realizados em seis amostras de cada tipo de elemento, sendo três amostras não preenchidas e três preenchidas com graute. Todos os pontos se encontram no centro da altura do respectivo bloco.

A escolha dos pontos de medição foi feita a fim de evitar a passagem da onda pelos furos da alvenaria. A velocidade da onda no ar é cerca de 10 vezes inferior à sua velocidade no concreto. Portanto, se os transdutores fossem posicionados em arranjo direto na direção em que o bloco é vazado, as primeiras ondas captadas pelo transdutor seriam as que desviassem do furo e seguissem pelas paredes do bloco. Logo, por terem percorrido um percurso maior, estas ondas teriam sofrido maior atenuação e teriam menor amplitude ao chegar no receptor em comparação às ondas emitidas por transdutores posicionados nos septos. Além disso, devido à necessidade de desviar do furo da alvenaria, a trajetória percorrida pela onda seria de determinação mais difícil que a trajetória direta.

Para a realização do ensaio de VPU, utilizou-se o aparelho de ultrassom PunditLab (Figura 3.18a) e, para visualização e gravação do sinal obtido, o software Punditlink, ambos produzidos pela Proceq[®]. Este aparelho tem resolução de 0,1 μ s e pode ser usado com transdutores de frequência nominal variando entre 24 kHz e 500 kHz. As medidas ultrassônicas foram realizadas com transdutores de onda de cisalhamento, com frequência nominal de 250 kHz (Figura 3.18b).

Figura 3.18 – Equipamentos utilizados para a realização do ensaio de VPU: (a) aparelho PunditLab e (b) transdutor de cisalhamento de 250kHz



Fonte: da autora

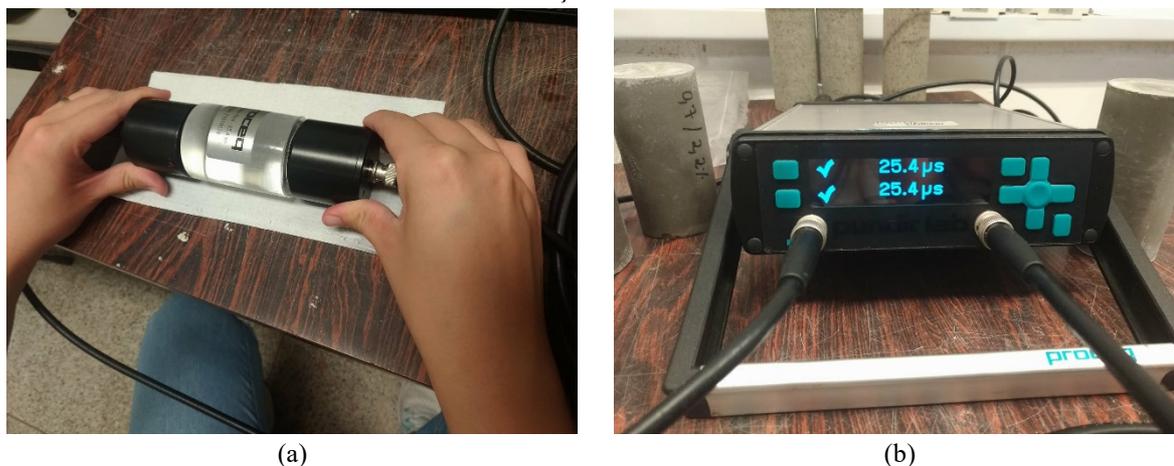
Os transdutores de onda de cisalhamento utilizados emitem também ondas longitudinais, eliminando a necessidade de usar outro tipo de transdutor. Além disso, conforme demonstrado por diversos autores (LILLAMAND et al., 2010; SCHIAVON, 2015), ondas polarizadas na direção do carregamento apresentam maior sensibilidade ao efeito acustoelástico que ondas polarizadas em outras direções. Portanto, priorizou-se o estudo de ondas de cisalhamento no presente trabalho.

Neste trabalho, optou-se por analisar somente ondas se propagando no sentido transversal ao carregamento. Embora o efeito acustoelástico seja mais pronunciado em ondas longitudinais que se propagam na direção do carregamento, no caso particular da alvenaria, esta onda teria que atravessar sucessivas interfaces entre bloco e argamassa, causando uma grande dispersão na energia da onda. Segundo McCann e Forde (2001), o ensaio de ultrassom só deve ser usado em blocos individuais de alvenaria, devido à atenuação do sinal na interface. Além disso, na avaliação de um edifício de alvenaria real, a direção transversal ao carregamento é a única direção em que seria possível realizar o ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico.

Para o acoplamento dos transdutores à superfície do bloco, utilizou-se material acoplante específico para a transmissão de ondas de cisalhamento de incidência normal à superfície de contato. Foram utilizados acoplantes produzidos pelas empresas Echo Ultrasonics® e Magnaflux®, conforme a disponibilidade no mercado. Ambos os fabricantes recomendam a faixa de temperatura entre 4 °C e 32 °C para o bom desempenho do produto.

A fim de realizar o ensaio de VPU, é necessário verificar a calibração do aparelho de ultrassom. Para tanto, é utilizado um cilindro cujo comprimento e velocidade de propagação ultrassônica já são conhecidos (Figura 3.19a). A calibração do aparelho é confirmada quando o tempo necessário para a onda ultrassônica percorrer o cilindro é igual a 25.4 μ s (Figura 3.19b).

Figura 3.19 – Verificação da calibração do aparelho de ultrassom: (a) cilindro de calibração e (b) aparelho com calibração verificada



Fonte: da autora

Como foram utilizados dois pares de transdutores iguais simultaneamente, utilizou-se também cabos coaxiais de mesmo comprimento para fazer a conexão entre a chave seletora e todos os transdutores. Inicialmente, calibrava-se o aparelho para um dos pares de transdutores; confirmada a calibração do aparelho para o primeiro par, alterava-se o canal na chave seletora e a calibração era verificada para o outro par de transdutores por meio do tempo de chegada da onda e observação do sinal propagado. Este procedimento foi repetido antes de cada ensaio de VPU realizado ao longo do programa experimental.

Os transdutores de ondas de cisalhamento foram fixados aos elementos de alvenaria com o auxílio de ganchos de aço de diâmetro 6,3 mm dobrados especificamente para este fim. Os ganchos e a fixação são mostrados na Figura 3.20. Além dos transdutores para emissão de ondas de cisalhamento, todos os elementos foram instrumentados com dois transdutores do tipo LVDT para verificação do deslocamento e, conseqüentemente, da deformação provocada pelo carregamento aplicado. A Figura 3.20 mostra ainda o posicionamento dos transdutores com o conector na direção vertical a fim de garantir que a polarização da onda ocorra na direção do carregamento.

A Figura 3.21 mostra a configuração do ensaio em blocos ocos e preenchidos. A viga metálica sob o bloco foi necessária uma vez que a menor altura possível de instalação do pórtico de reação ainda gerava um vão maior do que poderia ser vencido pelo curso do atuador sobre o bloco. O efeito da presença da viga nos resultados pode ser desprezado uma vez que o elemento tem uma rigidez muito superior à do bloco e, portanto, não apresenta deformações que interfiram na distribuição de tensões no bloco. Além disso, a viga apresenta contenções laterais na região sob o bloco, o que garante que a mesa não vai apresentar rotações mesmo que haja

excentricidade no carregamento. A variação relativa de velocidade com a tensão aplicada foi avaliada no septo central e no septo externo dos blocos.

Figura 3.20 – Fixação dos transdutores



Fonte: da autora

Figura 3.21 – Configuração do ensaio de acustoelasticidade realizado em blocos



Fonte: da autora

Os testes em prismas são mostrados na Figura 3.22. Conforme mostrado na Figura 3.22a, os prismas ocios foram submetidos a ensaios de VPU nos septos centrais e em um dos septos externos de todos os seus blocos. Por haver disponibilidade de quatro transdutores iguais, foi possível avaliar dois pontos simultaneamente em um mesmo ciclo. Foram avaliados sempre dois pontos em um mesmo bloco e a sequência de ensaios foi realizada partindo do bloco inferior em direção ao superior.

Figura 3.22 – Configuração do ensaio de acustoelasticidade realizado em prismas: (a) prisma de dois blocos vazio e (b) marcações em prisma de três blocos preenchido



(a)



(b)

Fonte: da autora

Conforme marcado no prisma mostrado na Figura 3.22b, elementos preenchidos foram analisados nos septos e no centro do furo. Assim como nos ensaios em prismas ocios, dois septos em um mesmo bloco foram analisados por ciclo, com a sequência partindo do bloco inferior para o superior. Após os ensaios nos septos, foram realizadas as medidas na direção do preenchimento. Assim como nos ensaios em blocos, as amostras novamente foram instrumentadas com dois transdutores de deslocamento do tipo LVDT a fim de monitorar as deformações desenvolvidas nas amostras ao longo do experimento.

Por fim, foram realizados ensaios em pequenas paredes, com e sem preenchimento, com os transdutores posicionados nos pontos mostrados na Figura 3.16. Uma parede posicionada para ensaio é mostrada na Figura 3.23.

Assim como nos ensaios de caracterização das pequenas paredes, um perfil metálico foi utilizado para realizar a distribuição dos esforços de compressão. Dois transdutores do tipo LVDT foram utilizados para monitorar as deformações desenvolvidas pelas amostras. Tiras de borracha foram utilizadas para manter os transdutores de ultrassom posicionados durante o ensaio. A sequência de ensaio nas paredes foi a seguinte: medidas nos septos dos blocos de terceira fiada, medidas nos septos dos blocos de segunda e quarta fiadas e, em paredes

preenchidas, medidas no preenchimento dos blocos de terceira fiada e medidas no preenchimento dos blocos de segunda e quarta fiadas.

Figura 3.23 – Pequena parede posicionada para ensaio



Fonte: da autora

3.10 Análise da variação relativa de velocidade em ensaios de VPU

Após a realização dos ensaios de VPU, torna-se necessário adotar um método de análise de sinais para determinar a variação de velocidade devido à aplicação de tensão nas amostras. Nesta pesquisa, a variação relativa de velocidade entre as ondas ultrassônicas foi obtida por meio de aplicações da função correlação cruzada, avaliada na região de chegada da onda de cisalhamento.

A função correlação cruzada, conforme proposta por Snieder et al. (2002), é utilizada para obter a variação relativa de velocidade em um meio após uma perturbação, mesmo que esta variação seja pequena. Para tanto, é estudada a função correlação cruzada entre os dois sinais em função de um deslocamento no eixo do tempo Δt de um dos sinais, conforme definida na Equação (3.6).

$$CC^{(t,T)}(\Delta t) = \frac{\int_{t-T}^{t+T} u_{np}(t')u_p(t'+\Delta t)dt'}{\sqrt{\int_{t-T}^{t+T} u_{np}^2(t')dt' \int_{t-T}^{t+T} u_p^2(t')dt'}} \quad (3.6)$$

Na Equação (3.6), u_{np} corresponde à função do sinal que se propagou pelo meio não perturbado e u_p corresponde ao sinal do meio perturbado. Os parâmetros t e $2T$ caracterizam o trecho do sinal que será usado na determinação da correlação cruzada e correspondem, respectivamente, ao tempo central da janela e ao tamanho da janela em tempo.

A defasagem de tempo entre os dois sinais é igual ao valor de Δt que gera o máximo valor da função correlação cruzada. A variação de velocidade relativa é dada pela Equação (3.7).

$$\frac{dV}{V_0} = -\frac{\Delta t}{t} \quad (3.7)$$

Para as análises realizadas no presente trabalho, utilizou-se esta técnica de correlação cruzada, com janelas de 20 μs . O valor ideal destes parâmetros varia com o material avaliado e com a distância percorrida pela onda. O tamanho de janela de 20 μs foi definido empiricamente. O ponto central está relacionado ao tipo de onda que se quer avaliar. Deve ser observada a janela definida pelos parâmetros escolhidos e identificado em que região do sinal esta janela está inserida. Se for escolhido um ponto central próximo ao tempo de chegada de ondas primárias, a variação encontrada será referente às ondas longitudinais; um ponto central próximo à região de chegada das ondas secundárias indica uma análise de ondas de cisalhamento. É possível avaliar esta variação também utilizando pontos centrais maiores, correspondentes às ondas de chegada tardia (ondas coda). Neste trabalho, o valor de 65,4 μs foi definido a fim de verificar a variação de velocidade em ondas de cisalhamento.

3.11 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foi apresentada a metodologia desenvolvida ao longo do programa experimental. Inicialmente, foram descritos os ensaios de caracterização realizados em blocos, prismas e pequenas paredes. A análise dimensional foi realizada em blocos e meio blocos. Nos blocos, foram realizados ainda ensaios de absorção e determinação da área líquida. Todos os elementos ocios e preenchidos foram caracterizados quanto ao seu comportamento mecânico (determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade). Os procedimentos normativos utilizados para a execução e a aceitação dos ensaios foram listados no texto.

Descreveu-se também a metodologia utilizada para a realização dos ensaios ultrassônicos em elementos de alvenaria ocios e preenchidos submetidos a compressão uniaxial, a fim de analisar o efeito acustoelástico nas amostras. Os equipamentos utilizados, a instrumentação e a configuração do ensaio foram apresentadas com esquemas e fotos dos ensaios. Por fim, foi apresentado o método de análise de resultados, baseado na aplicação da função correlação cruzada para determinação da variação relativa de velocidade entre sinais ultrassônicos.

4. Resultados experimentais

Este capítulo apresenta os resultados obtidos ao longo do programa experimental. São apresentados inicialmente os resultados dos ensaios de caracterização de blocos, argamassa, prismas, pequenas paredes, graute e elementos preenchidos. Em seguida, apresenta-se o método de análise de resultados de VPU e, por fim, são mostrados os resultados dos ensaios para avaliação da acustoelasticidade.

4.1 Análise dimensional de blocos e meio blocos

A análise dimensional foi o primeiro ensaio de caracterização realizado em blocos. As dimensões medidas são mostradas na Tabela 4.1, assim como a média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) dos resultados. A partir dos dados obtidos, a área bruta dos blocos avaliados é de 54257,81 mm².

Tabela 4.1 – Dimensões dos blocos (mm)

Bloco	Largura	Comprimento	Altura	Dimensão dos furos	
				Longitudinal	Transversal
Bloco 1	138,3	391,0	189,0	147,5	76,5
Bloco 2	139,0	389,7	187,0	148,5	78,0
Bloco 3	139,2	391,0	189,3	146,5	76,0
Bloco 4	139,2	390,7	190,0	148,0	77,5
Bloco 5	139,0	390,3	190,0	148,0	77,5
Bloco 6	139,0	390,3	190,7	148,5	77,0
Média	138,9	390,5	189,3	147,8	77,1
DP	0,37	0,60	1,25	0,80	0,86
CV (%)	0,27	0,15	0,66	0,54	1,12

Fonte: da autora

A aceitação dos blocos foi realizada de acordo com os parâmetros de tolerância listados pela ABNT NBR 6136:2016. Os blocos foram aprovados em todas as dimensões, conforme mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Aceitação de largura, comprimento e altura dos blocos (mm)

Elemento	Dimensão	Nominal	Medido	Diferença	Tolerância	Aceitação
	Largura	140	138,9	-1,1	2,0	OK
Bloco	Comprimento	390	390,5	0,5	3,0	OK
	Altura	190	189,3	-0,7	3,0	OK

Fonte: da autora

A Tabela 4.3 relaciona as espessuras de parede medidas em cada bloco, assim como as espessuras equivalentes mínimas.

Tabela 4.3 – Espessura das paredes dos blocos

Bloco	Espessura de parede (mm)		Espessura equivalente
	Longitudinal	Transversal	mínima (mm/m)
Bloco 1	26,04	25,40	194,86
Bloco 2	25,78	25,70	197,84
Bloco 3	26,27	25,12	192,71
Bloco 4	26,21	25,30	194,28
Bloco 5	25,91	25,18	193,50
Bloco 6	26,08	25,11	193,01
Média	26,05	25,30	-
DP	0,50	0,65	
CV (%)	1,93	2,57	

Fonte: da autora

Novamente, os resultados experimentais foram comparados às medidas mínimas indicadas pela ABNT NBR 6136:2016, e os blocos atenderam aos critérios de aceitação (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Aceitação de espessura de paredes de blocos (mm)

Dimensão	Mínimo	Medido	Aceitação
Paredes longitudinais	25	26,05	OK
Paredes transversais	25	25,30	OK
Espessura equivalente	188	192,71	OK
Menor dimensão do furo	70	77,1	OK

Fonte: da autora

Além dos blocos, foram avaliadas também as dimensões dos meio blocos. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.5, com todas as medidas em milímetros. A comparação entre resultados experimentais e os critérios normativos para aprovação das dimensões dos meio blocos é mostrada na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 – Dimensões dos meio-blocos (mm)

Bloco	Largura	Comprimento	Altura
Bloco 1	138,3	190,0	189,3
Bloco 2	139,0	189,0	188,3
Bloco 3	138,7	189,3	189,7
Bloco 4	137,7	188,7	189,3
Bloco 5	137,3	189,3	188,0
Bloco 6	138,0	189,3	187,7
Média	138,2	189,3	188,7
DP	0,69	0,73	0,93
CV (%)	0,50	0,39	0,49

Fonte: da autora

Tabela 4.6 – Aceitação de largura, comprimento e altura dos meio blocos (mm)

Elemento	Dimensão	Nominal	Medido	Diferença	Tolerância	Aceitação
	Largura	140	138,2	-1,8	2,0	OK
Meio bloco	Comprimento	190	189,3	-0,7	3,0	OK
	Altura	190	188,7	-1,3	3,0	OK

Fonte: da autora

4.2 Absorção de água e área líquida de blocos

Os resultados dos ensaios de absorção de água e área líquida dos blocos é mostrado na Tabela 4.7.

Apesar do alto coeficiente de variação encontrado nos valores de absorção, os critérios de absorção máxima aceitável preconizados pela ABNT NBR 6136:2016 foram atendidos para todos os blocos individuais (limite de 9% de absorção) e considerando a média dos resultados (limite de 8% de absorção).

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de absorção de água e área líquida

	Massa seca m₁ (g)	Massa saturada m₂ (g)	Massa aparente m₃ (g)	Absorção (%)	Área líquida (mm²)
Bloco 1	11912	12550	7105,6	5,36	28760,7
Bloco 2	12936	13378	7862,6	3,42	29135,8
Bloco 3	12566	13090	7567,6	4,17	29172,7
Média	12471,3	13006,0	7511,9	4,31	29023,1
DP	423,4	343,2	311,5	0,80	186,1
CV (%)	3,39	2,64	4,15	18,50	0,64

Fonte: da autora

A área líquida média encontrada foi de 29023,1 mm², resultando numa relação área líquida/área bruta de 53,5%, abaixo do limite de 75%. Portanto, os blocos podem ser considerados vazados de acordo com a ABNT NBR 6136:2016.

4.3 Resistência à compressão de blocos e meio blocos

O resumo dos resultados obtidos experimentalmente é mostrado na Tabela 4.8. Todos os valores de tensão listados são mostrados em relação à área bruta. Os blocos haviam sido solicitados com f_{bk} de 10 MPa na área bruta. Como pode ser observado, a resistência medida foi muito superior à requisitada.

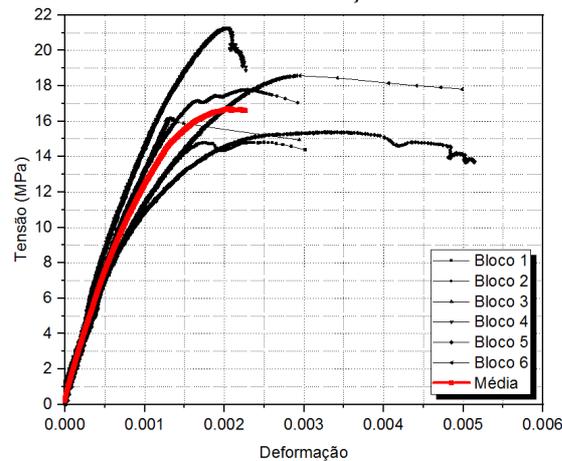
Tabela 4.8 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão de blocos

Bloco	Resistência, A_{bruta} (MPa)	Resistência, A_{líq} (MPa)	E_p na A_{bruta} (GPa)
Bloco 1	14,90	27,85	12,97
Bloco 2	15,48	28,94	13,74
Bloco 3	16,26	30,39	16,54
Bloco 4	17,90	33,46	16,17
Bloco 5	18,70	34,94	13,26
Bloco 6	21,43	40,04	18,33
Média	17,45	32,60	15,17
DP	2,21	4,13	1,97
CV (%)	12,66	12,66	13,02
$f_{bk,est}$	14,13	-	-

Fonte: da autora

Um outro dado importante obtido por meio do ensaio de compressão consiste na curva tensão-deformação média dos blocos, que é um parâmetro utilizado em simulações numéricas e necessário para a determinação do módulo de deformação do material. As curvas individuais dos blocos ensaiados, assim como a curva média, são mostradas na Figura 4.1. As deformações mostradas no gráfico foram obtidas a partir da média dos deslocamentos medidos com os transdutores clip-gage.

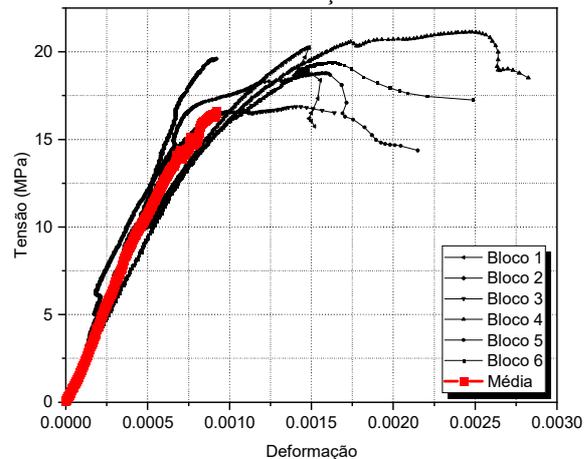
Figura 4.1 – Curvas tensão x deformação dos blocos analisados



Fonte: da autora

A Tabela 4.9 mostra o resumo dos valores de resistência dos meio blocos encontrados experimentalmente e a Figura 4.2 mostra o comportamento das respectivas curvas tensão x deformação, assim como a curva média obtida.

Figura 4.2 – Curva tensão x deformação dos meio-blocos analisados



Fonte: da autora

Tabela 4.9 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão dos meio-blocos

Bloco	Resistência, A_{bruta} (MPa)
Bloco 1	16,86
Bloco 2	18,66
Bloco 3	19,39
Bloco 4	19,60
Bloco 5	20,25
Bloco 6	21,13
Média	19,32
DP	1,33
CV (%)	6,91

Fonte: da autora

4.4 Caracterização da argamassa

A Tabela 4.10 apresenta os resultados do ensaio para determinação do Índice de Consistência encontrados para os dois traços de argamassa estudados.

Tabela 4.10 – Determinação do Índice de Consistência

Traço em volume	Índice de consistência (mm)	Relação a/c
1: 0,5: 4,5	265	1,3
1: 0,25: 3	276	0,85

Fonte: da autora

Inicialmente, foi analisada a viabilidade da utilização do traço de argamassa de 1:0,5:4,5 (cimento: cal: areia) em volume. A resistência à compressão obtida com amostras deste traço é mostrada na Tabela 4.11.

A partir dos dados encontrados na Tabela 4.8 e na Tabela 4.11, percebe-se que a relação entre a resistência da argamassa e a resistência do bloco é de 23%. Embora esta resistência seja permitida por norma, Ramalho e Correa (2003) afirmam que se a resistência da argamassa for inferior a 30% da resistência do bloco, esta pode influenciar negativamente a resistência do prisma. Os autores indicam ainda que seja adotado um mínimo de 70% da resistência do bloco na área bruta para a resistência da argamassa. Neste sentido, optou-se por usar um traço de argamassa mais resistente, de 1: 0,25: 3 em volume. É importante lembrar também que, de acordo com a ABNT NBR 15961-1:2011, a resistência à compressão da argamassa deve ser inferior a 70% da resistência do bloco, medida na área líquida. A ABNT NBR 15961-2:2011

traz ainda a recomendação de que a argamassa produzida deve apresentar coeficiente de variação inferior a 20% nos ensaios de controle de obra, valor muito superior ao CV encontrado nos ensaios de caracterização realizados. A Tabela 4.12 resume os dados obtidos a partir do ensaio de resistência à compressão do segundo traço testado.

Tabela 4.11 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão da argamassa 1:0,5:4,5

Cilindro	Tensão (MPa)
CP1	3,31
CP2	2,90
CP3	3,46
CP4	3,69
CP5	2,82
CP6	3,36
Média	3,26
DP	0,31
CV (%)	9,45

Fonte: da autora

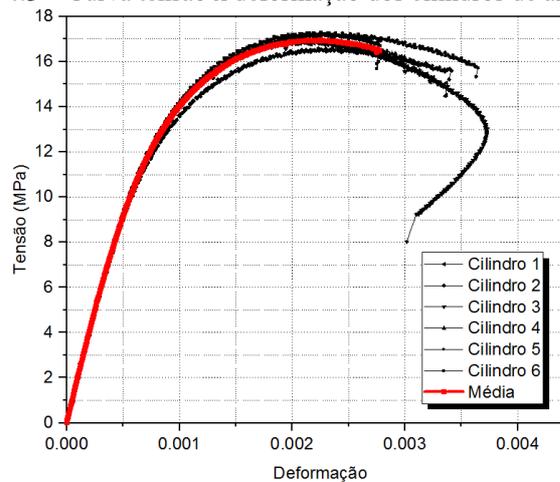
Tabela 4.12 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão da argamassa 1:0,25:3

Cilindro	Tensão (MPa)	E (GPa)
CP1	16,91	20,00
CP2	16,60	21,03
CP3	17,00	19,65
CP4	16,99	20,08
CP5	17,26	19,81
CP6	17,29	19,54
Média	17,01	20,02
DP	0,23	488,55
CV (%)	1,35	2,44

Fonte: da autora

Uma vez definido o traço de argamassa a ser utilizado para assentamento dos prismas e paredes, são traçadas as curvas que relacionam a tensão e a deformação em cada cilindro, assim como a curva do comportamento médio das amostras. Todas estas curvas são mostradas na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Curva tensão x deformação dos cilindros de argamassa



Fonte: da autora

4.5 Caracterização dos prismas ocós

O resumo dos resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à compressão dos prismas de dois blocos é mostrado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão dos prismas de dois blocos

Prisma	f_p (MPa)	E_p (GPa)
Prisma 1	9,55	9,44
Prisma 2	10,81	6,22
Prisma 3	12,49	10,24
Prisma 4	12,75	8,91
Prisma 5	13,50	10,33
Prisma 6	13,72	10,82
Prisma 7	13,87	9,71
Prisma 8	13,98	10,34
Prisma 9	14,44	9,95
Prisma 10	14,54	9,25
Prisma 11	15,33	8,53
Prisma 12	16,94	11,28
Média	13,49	9,58
DP	1,87	1,26
CV (%)	13,87	13,16
f_{pk}	9,92	-
f_{pk}/f_{bk}	0,70	-

Fonte: da autora

O resumo dos resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados nos prismas de três blocos são mostrados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão dos prismas de três blocos

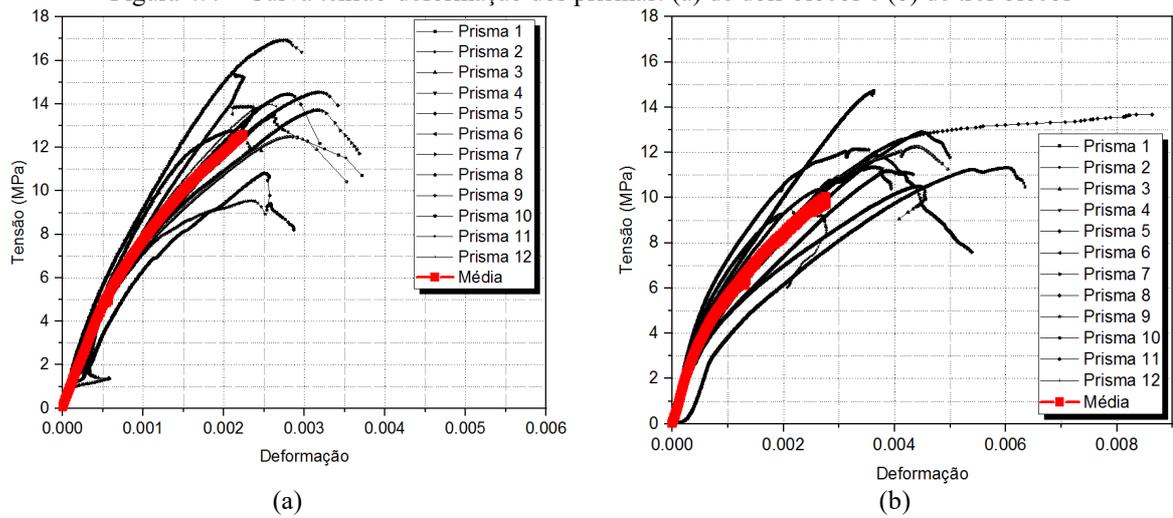
Prisma	f_p (MPa)	E_p (GPa)
Prisma 1	9,22	8,27
Prisma 2	10,42	9,94
Prisma 3	10,50	6,75
Prisma 4	11,18	6,37
Prisma 5	11,31	5,65
Prisma 6	11,36	6,48
Prisma 7	11,87	8,94
Prisma 8	12,15	10,77
Prisma 9	12,26	8,40
Prisma 10	12,90	7,37
Prisma 11	13,68	7,13
Prisma 12	14,71	8,12
Média	11,80	7,85
DP	1,43	1,46
CV (%)	12,14	18,57
f_{pk}	9,69	-
f_{pk}/ f_{bk}	0,69	

Fonte: da autora

Segundo Ramalho e Correa (2003), a eficiência prisma/bloco varia entre 0,5 e 0,9 para elementos de blocos de concreto. Neste trabalho, esta relação foi de 0,70 para os prismas de dois blocos e 0,69 para os prismas de três blocos, indicando que a resistência encontrada está dentro da faixa esperada.

As curvas tensão-deformação obtidas experimentalmente para cada um dos prismas de dois e três blocos são mostradas na Figura 4.4, assim como as curvas tensão-deformação média para os dois tipos de prisma.

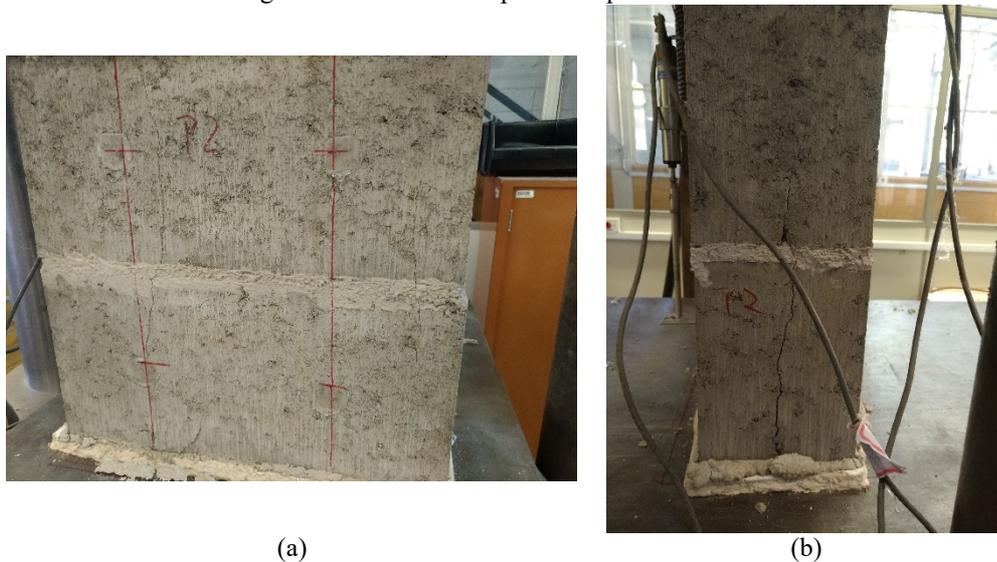
Figura 4.4 – Curva tensão-deformação dos prismas: (a) de dois blocos e (b) de três blocos



Fonte: da autora

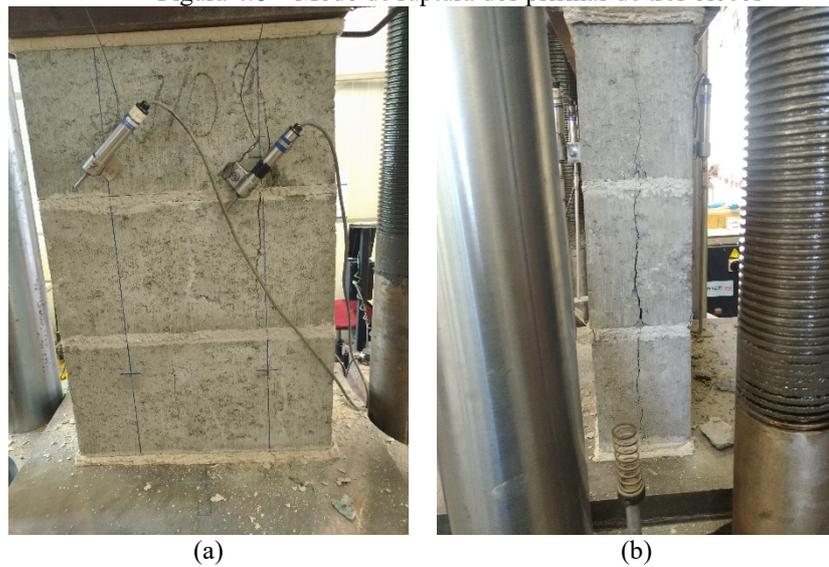
A Figura 4.5 ilustra o modo de ruptura dos prismas de dois blocos, que foi similar à ruptura dos prismas de três blocos (Figura 4.6). Segundo Oliveira (2014), os prismas com argamassamento parcial rompem primariamente devido ao surgimento de tensões de tração nas paredes laterais. Nos prismas analisados, que foram assentados com argamassamento total, a ruptura ocorreu com fissuração nas paredes laterais e na região do centro do furo na maior parede.

Figura 4.5 – Modo de ruptura dos prismas de dois blocos



Fonte: da autora

Figura 4.6 – Modo de ruptura dos prismas de três blocos

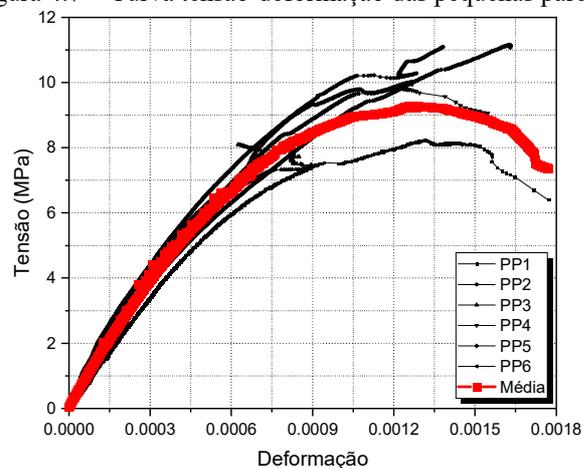


Fonte: da autora

4.6 Caracterização das pequenas paredes

O resumo dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão em pequenas paredes é mostrado na Tabela 4.15. Segundo a ABNT NBR 15961-1:2011, a resistência da parede é dada por 70% da resistência do prisma ou 85% da resistência da pequena parede. Considerando os materiais utilizados nesta pesquisa, 70% da resistência do prisma de dois blocos é equivalente a 6,94 MPa, enquanto 85% da resistência da pequena parede corresponde a 6,12 MPa. Comparando esses dois valores, o resultado encontrado no ensaio de resistência à compressão das pequenas paredes é compatível com o comportamento mecânico apresentado pelos prismas. As curvas de comportamento tensão-deformação das pequenas paredes são mostradas na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Curva tensão-deformação das pequenas paredes



Fonte: da autora

Tabela 4.15 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão de pequenas paredes

Parede	f_{pp} (MPa)	E_p (GPa)
Pequena parede 1	8,09	16,66
Pequena parede 2	8,21	11,16
Pequena parede 3	9,82	12,30
Pequena parede 4	10,01	13,39
Pequena parede 5	11,09	15,26
Pequena parede 6	11,15	12,28
Média	9,73	13,51
DP	1,22	1,89
CV (%)	12,53	14,02
f_{ppk}	7,20	-
f_{ppk}/f_{bk}	0,51	-

Fonte: da autora

O modo de ruptura das pequenas paredes foi similar ao modo de ruptura dos prismas, com desenvolvimento de fissuras verticais ao longo da altura da parede nos lados de menor dimensão. A Figura 4.8 mostra a ocorrência destas fissuras ao longo dos ensaios de resistência à compressão.

Figura 4.8 – Modo de ruptura das pequenas paredes



Fonte: da autora

4.7 Caracterização do graute

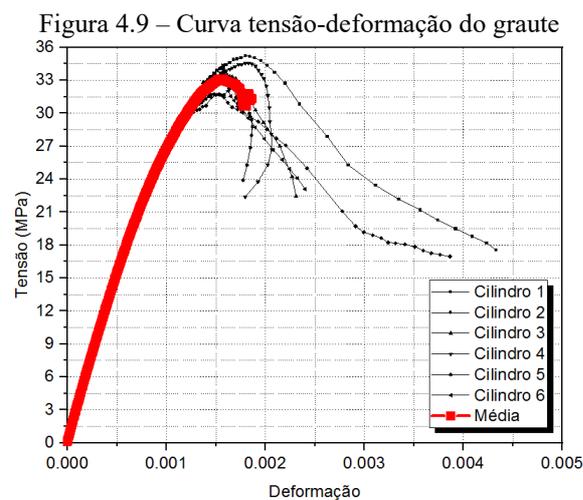
O resumo dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de graute é apresentado na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão do graute

Cilindro	Tensão (MPa)	E (GPa)
CP1	35,23	29,84
CP2	32,21	34,69
CP3	33,57	30,36
CP4	34,57	30,99
CP5	31,72	31,89
CP6	34,24	32,07
Média	33,59	31,64
DP	1,26	1,57
CV (%)	3,74	4,97
f_{ck}	30,29	

Fonte: da autora

A ABNT NBR 15961-1:2011 especifica uma resistência mínima de 15 MPa para o graute. Conforme mostrado na Tabela 4.16, este critério foi atendido e a resistência para o graute encontrada foi similar à resistência à compressão do bloco na área líquida. Além disso, o módulo de deformação médio dos blocos na área líquida corresponde a 28,34 GPa, próximo aos 31,64 GPa de módulo de elasticidade do graute, indicando boa compatibilidade entre os materiais. O gráfico apresentando o comportamento das curvas tensão-deformação dos corpos de prova é mostrado na Figura 4.9.



4.8 Caracterização dos elementos preenchidos com graute

O resumo dos resultados obtidos em ensaios de resistência à compressão em blocos preenchidos é mostrado na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão dos blocos preenchidos

Bloco	Tensão (MPa)	E_p (GPa)
Bloco 1	21,81	10,63
Bloco 2	24,44	31,28
Bloco 3	21,54	26,82
Bloco 4	19,30	27,99
Bloco 5	29,34	31,41
Bloco 6	30,11	28,55
Média	24,42	26,11
DP	4,04	7,12
CV (%)	16,54	27,27
$f_{bk, est}$	19,03	

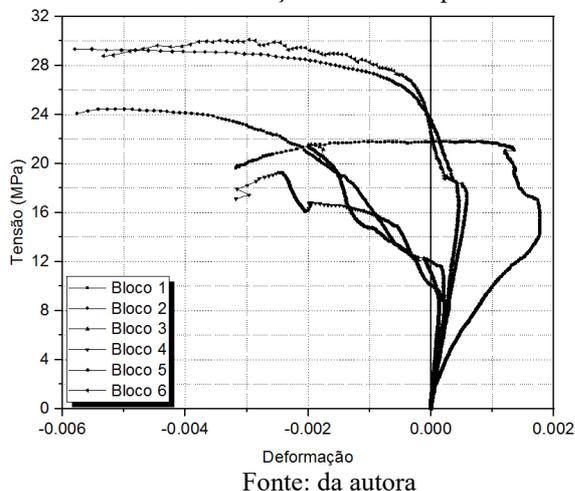
Fonte: da autora

A partir da Tabela 4.17, podemos observar que o preenchimento com graute gerou um aumento de resistência de 34,66% nos blocos. Segundo Ramalho e Correa (2003), a avaliação da influência do preenchimento com graute sobre a resistência do bloco de concreto é de simples avaliação, uma vez que os materiais são similares. Segundo os autores, o preenchimento de blocos de concreto com graute aumenta a resistência do bloco pelo aumento da área líquida do conjunto. Entretanto, observa-se na prática que, por mais que os materiais tenham resistência e módulo de elasticidade similares, o preenchimento não chega a dobrar a resistência do bloco.

A Figura 4.10 mostra a curva tensão-deformação dos blocos preenchidos com graute. Como pode ser observado no gráfico, os blocos apresentaram deformações de tração apesar do carregamento de compressão. Para o ensaio dos blocos utilizou-se a chapa de maior espessura disponível no laboratório (50 mm) para distribuição do carregamento na superfície do bloco. Entretanto, como pode ser observado, esta não foi suficiente para garantir que o bloco se deformasse igualmente e é provável que o carregamento de compressão centrado no meio do bloco tenha feito com que o centro do furo (onde o transdutor foi instalado) se expandisse, gerando deformação de tração. Oliveira (2014) observou o mesmo comportamento quando realizou ensaios de resistência à compressão em prismas de blocos de concreto. Mohamad

(2007) comenta que o desenvolvimento de tensões de tração é mais significativo em elementos preenchidos, devido ao acréscimo de deformação lateral.

Figura 4.10 – Curva tensão-deformação dos blocos preenchidos com graute



No entanto, ressalta-se que, como a medida do módulo de deformação é feita a partir do módulo secante aos pontos de 5% e 30% do carregamento máximo, o valor calculado do módulo E_p não foi afetado pelo comportamento anômalo das amostras.

Os resumos dos resultados obtidos durante os ensaios de resistência à compressão de prismas preenchidos de dois e três blocos são mostrados na Tabela 4.18 e na Tabela 4.19, respectivamente.

As curvas tensão-deformação dos prismas preenchidos de dois e três blocos são mostradas na Figura 4.11. O prisma de dois blocos preenchido teve uma eficiência similar à dos prismas ocios. Neste caso, a referência utilizada para o cálculo da eficiência foi o bloco preenchido. O prisma preenchido de três blocos teve uma eficiência menor, de 0,55, mas ainda assim dentro do intervalo de 0,5 a 0,9 mencionado por Ramalho e Correa (2003).

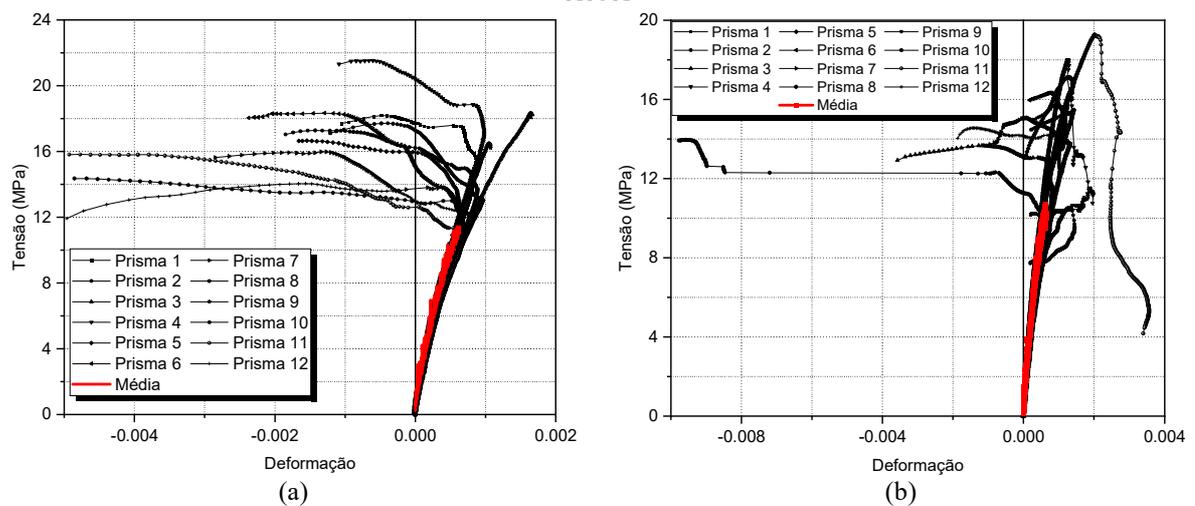
A Tabela 4.20 mostra o resumo dos resultados obtidos em ensaios de resistência à compressão de pequenas paredes preenchidas com graute. A Figura 4.12 mostra as curvas tensão-deformação obtidas nestes ensaios para cada parede individual, assim como a curva que representa o comportamento médio entre as amostras. Como pode ser observado na Tabela 4.20, a eficiência da parede em relação ao bloco praticamente não se alterou considerando elementos preenchidos e não preenchidos, com diferença de apenas 3%. A eficiência do graute nas pequenas paredes foi de 27%, similar à eficiência encontrada para os outros elementos estudados após o preenchimento.

Tabela 4.18 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão dos prismas de dois blocos preenchidos

Prisma	f_p (MPa)	E_p (GPa)
Prisma 1	18,17	22,71
Prisma 2	17,72	19,04
Prisma 3	18,31	19,46
Prisma 4	21,53	22,88
Prisma 5	16,65	21,23
Prisma 6	18,34	21,80
Prisma 7	15,98	21,90
Prisma 8	14,36	19,98
Prisma 9	16,50	20,47
Prisma 10	17,26	18,96
Prisma 11	15,82	18,42
Prisma 12	14,04	23,44
Média	17,06	20,86
DP	1,92	1,63
CV (%)	11,29	7,83
f_{pk}	14,50	
f_{pk}/ f_{bk}	0,76	

Fonte: da autora

Figura 4.11 – Curva tensão-deformação dos prismas preenchidos com graute: (a) de dois blocos e (b) de três blocos



Fonte: da autora

Tabela 4.19 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão dos prismas de três blocos preenchidos

Prisma	f_p (MPa)	E_p (GPa)
Prisma 1	11,04	21,46
Prisma 2	10,49	19,54
Prisma 3	13,66	17,57
Prisma 4	18,00	22,39
Prisma 5	17,10	20,68
Prisma 6	16,33	24,08
Prisma 7	15,05	18,29
Prisma 8	13,96	24,42
Prisma 9	15,71	21,15
Prisma 10	15,47	28,22
Prisma 11	19,27	22,38
Prisma 12	14,56	19,76
Média	15,05	21,66
DP	2,47	2,81
CV (%)	16,41	12,99
f _{pk}	10,43	
f _{pk} / f _{bk}	0,55	

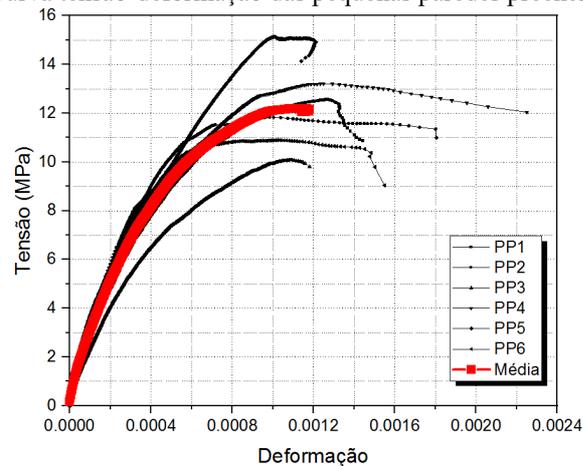
Fonte: da autora

Tabela 4.20 – Resumo dos ensaios de resistência à compressão de pequenas paredes preenchidas

Parede	f_{pp} (MPa)	E_p (GPa)
Pequena parede 1	10,08	20,03
Pequena parede 2	10,89	30,42
Pequena parede 3	11,84	30,56
Pequena parede 4	12,55	23,22
Pequena parede 5	13,21	30,36
Pequena parede 6	15,14	23,11
Média	12,28	26,29
DP	1,64	4,29
CV (%)	13,32	16,32
f _{ppk}	9,13	-
f _{ppk} / f _{bk}	0,48	-

Fonte: da autora

Figura 4.12 – Curva tensão-deformação das pequenas paredes preenchidas com graute



O modo de ruptura dos elementos preenchidos ocorreu com deslocamento das paredes do bloco e exposição do graute. Como pode ser observado na Figura 4.13 à Figura 4.16, as fissuras que levaram à ruptura dos elementos ocorreram sempre nas interfaces entre graute e bloco indicando que a compatibilidade de deslocamentos entre os materiais não foi perfeita. Segundo Miranda (2012), é possível que, ao comprimir o conjunto bloco-graute, a expansão lateral do graute devido ao efeito de Poisson contribua para diminuir a eficiência do elemento estrutural. Observando o modo de ruptura dos elementos preenchidos, fica claro que isto ocorreu nos modelos analisados e a expansão do graute causou o destacamento de placas das paredes do bloco.

Figura 4.13 – Modo de ruptura dos blocos preenchidos



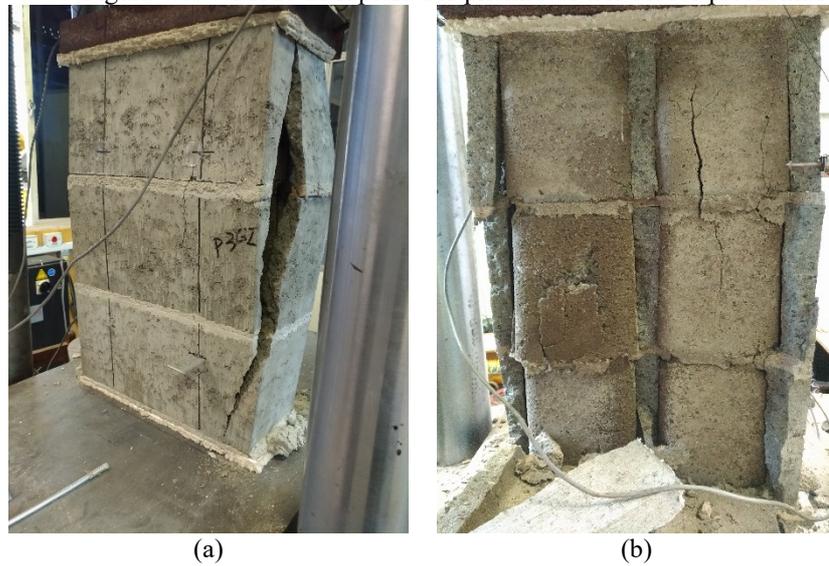
Fonte: da autora

Figura 4.14 – Modo de ruptura dos prismas de dois blocos preenchidos



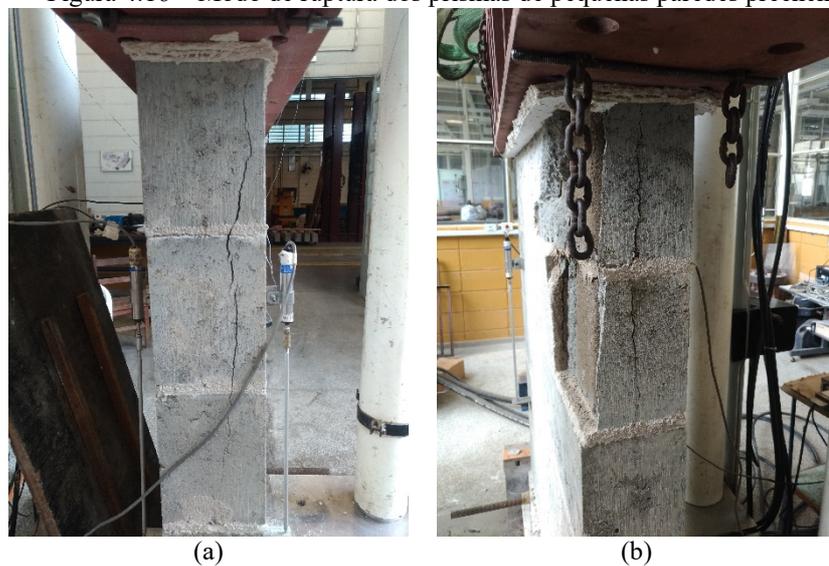
Fonte: da autora

Figura 4.15 – Modo de ruptura dos prismas de três blocos preenchidos



Fonte: da autora

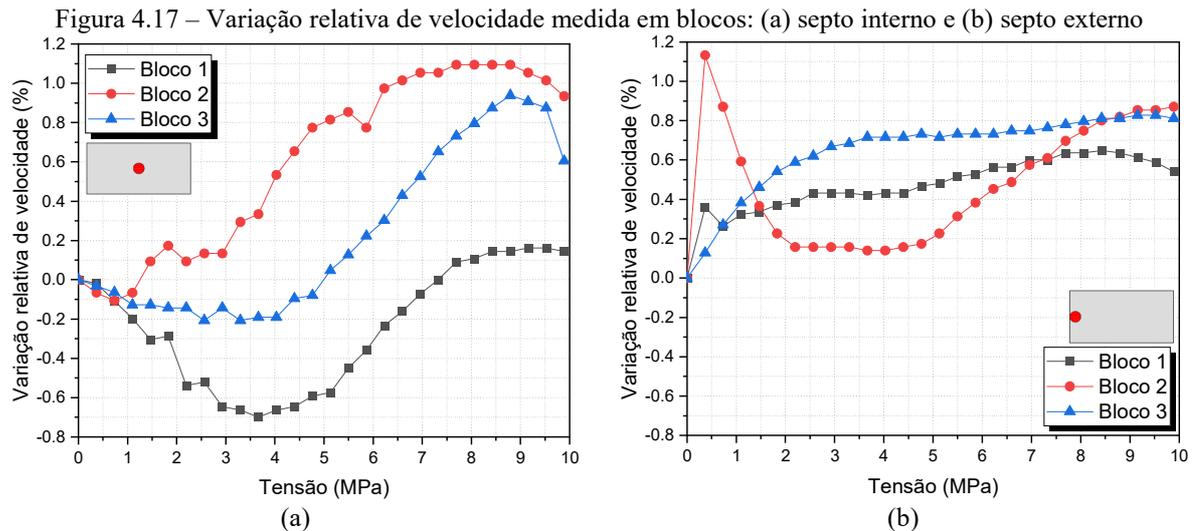
Figura 4.16 – Modo de ruptura dos prismas de pequenas paredes preenchidas



Fonte: da autora

4.9 Estudo da acustoelasticidade em blocos

Nos blocos avaliados, foram feitos ensaios de VPU em um dos septos externos do bloco e no septo central. A variação relativa de velocidade por tensão aplicada nos três blocos ensaiados é mostrada na Figura 4.17. Esta variação de velocidade foi calculada com relação ao sinal obtido nas amostras descarregadas ao fim do ensaio.



Fonte: da autora

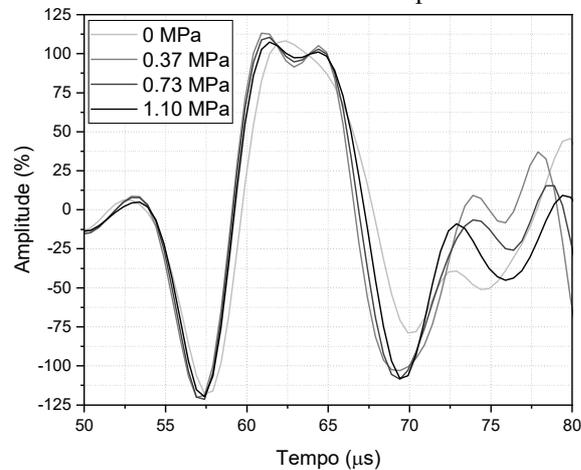
Com relação à variação de velocidade ocorrida no septo central (Figura 4.17a), observa-se uma grande oscilação nos valores registrados em cada amostra. Nestes ensaios, o carregamento utilizado foi superior a 70% do f_{bk} . Segundo Mehta e Monteiro (2008), com níveis de carregamento entre 30% e 50% da resistência do material, ocorre propagação das fissuras presentes na zona de transição. Neste nível de tensão, a propagação de fissuras é estável, ou seja, existe uma extensão máxima que essas fissuras podem atingir sob carregamento constante. Com níveis de carregamento entre 50% e 75% da carga última, ocorre a propagação de fissuras presentes na zona de transição de forma instável. Quando este carregamento se aproxima de 75% da resistência da amostra, novas fissuras ocorrem na matriz e a velocidade de propagação de fissuras aumenta.

Considerando os resultados observados durante a etapa de caracterização, a tensão máxima aplicada corresponde a 46% do carregamento suportado pelo bloco mais resistente e 67% do carregamento suportado pelo bloco menos resistente. Anteriormente aos ensaios ultrassônicos, 10 ciclos de carregamento foram aplicados aos elementos. Portanto, é possível que, dentre os blocos ensaiados, existam amostras que permaneceram em níveis de carregamento com propagação de fissuras estável e amostras em que ocorreram fissuras na

matriz. Neste sentido, a diferença entre os valores de variação relativa de velocidade pode ser decorrente dos diferentes níveis de degradação do material no início do ensaio ultrassônico.

Observando a Figura 4.17, podemos perceber que existe variação entre o comportamento dos blocos que pode ser justificado pela variabilidade do material. No entanto, há um trecho inicial na curva referente ao bloco 2 em que a variação de velocidade assume valores muito altos para baixos carregamentos. A fim de verificar se essa variação de velocidade é causada por um problema na análise, os sinais obtidos em ensaio para os níveis baixos de carregamento e o sinal de referência foram comparados (Figura 4.18).

Figura 4.18 – Sinais obtidos em ensaio no septo externo do bloco 2



A Figura 4.18 mostra as amplitudes dos sinais ao longo do tempo no trecho correspondente ao utilizado para determinação da correlação cruzada entre os sinais. Curvas com tons de cor mais escuros mostram maiores valores de tensão aplicada. Os sinais têm aspecto similar, indicando que a correlação cruzada pode ser usada para determinar a defasagem entre eles. No entanto, fica claro que as ondas que representam o meio carregado estão à frente no eixo do tempo e que estas três ondas se mostram mais rápidas quanto menor o carregamento aplicado nesta janela de tempo.

Uma vez demonstrado que a variação de velocidade mostrada na Figura 4.17b corresponde realmente ao comportamento apresentado pelos sinais, torna-se necessário considerar os outros fatores que afetam a velocidade da onda. A diferença de danificação na amostra seria insuficiente para explicar este comportamento, uma vez que o sinal obtido com o bloco descarregado é posterior à aplicação do carregamento. Variações climáticas de temperatura e pressão também são fatores de pouca influência, uma vez que a variação encontrada é de magnitude superior à observada na literatura gerada por esses fatores. Além

disso, a partir dos arquivos gerados durante o ensaio, determinou-se que a diferença de tempo entre essas medidas foi de aproximadamente cinco minutos, portanto tempo insuficiente para gerar grandes variações na temperatura e umidade ambientes. Outro fator que poderia gerar variações no sinal são diferenças no posicionamento dos transdutores, entretanto, estes instrumentos foram mantidos em posição fixa ao longo de todo o ensaio. Neste sentido, o comportamento anômalo dessa medida ainda não foi esclarecido.

Estimou-se ainda a velocidade das ondas longitudinais e de cisalhamento propagadas no bloco anteriormente à aplicação de carregamento. O tempo de chegada das ondas foi determinado com o auxílio da ferramenta computacional desenvolvida por Schiavon (2015). Considerou-se que a distância percorrida pelas ondas foi a largura nominal dos blocos (14 cm) e a velocidade nos blocos foi dada pela distância dividida pelo tempo de chegada de ondas longitudinais e de cisalhamento. O comprimento de onda foi calculado considerando a frequência nominal do transdutor utilizado (250 kHz) e seu valor máximo foi de 17,9 mm, inferior à espessura medida dos septos internos de 25,3 mm e dos septos externos de 26,05 mm. Estes valores são listados na Tabela 4.21. A Figura 4.19 ilustra uma onda típica obtida em ensaio, mostrando as amplitudes gravadas ao fim do ensaio no septo central do bloco 2. Os pontos de chegada das ondas foram destacados com círculos vermelhos, sendo a chegada das ondas longitudinais indicada por “OL” e a chegada das ondas de cisalhamento indicada por “OC”.

Tabela 4.21 – Velocidade de propagação e comprimento de onda nos blocos

Bloco	Velocidade de ondas P (m/s)		Velocidade de ondas S (m/s)		λ (mm)	
	Septo ext.	Septo int.	Septo ext.	Septo int.	Septo ext.	Septo int.
Bloco 1	4215,6	4055,6	2578,7	2542,2	16,9	16,2
Bloco 2	4448,7	4387,3	2674,8	2662,1	17,8	17,5
Bloco 3	4423,4	4477,1	2670,7	2714,8	17,7	17,9

Fonte: da autora

Os ensaios em blocos foram repetidos com carregamento máximo menor, correspondente a aproximadamente 30% da tensão de ruptura, a fim de verificar as suas curvas acustoelásticas enquanto o material tem comportamento elástico-linear (Figura 4.20). Principalmente no septo externo, os gráficos apresentam comportamento linear. A Tabela 4.22 mostra os coeficientes acustoelásticos, que foram obtidos por meio de regressão linear. A

regressão foi calculada separadamente para cada curva e todos os pontos de uma mesma curva foram considerados.

Figura 4.19 – Onda típica obtida experimentalmente em blocos

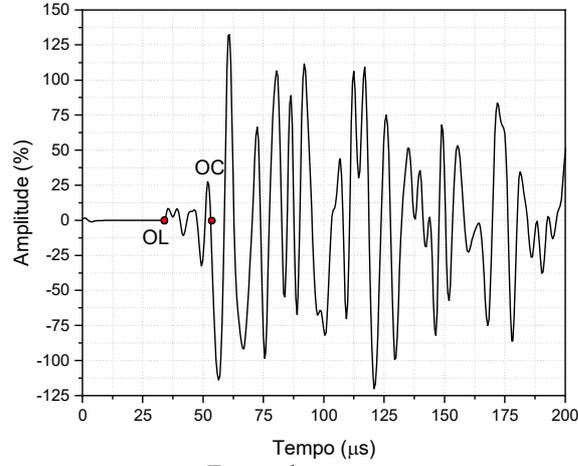
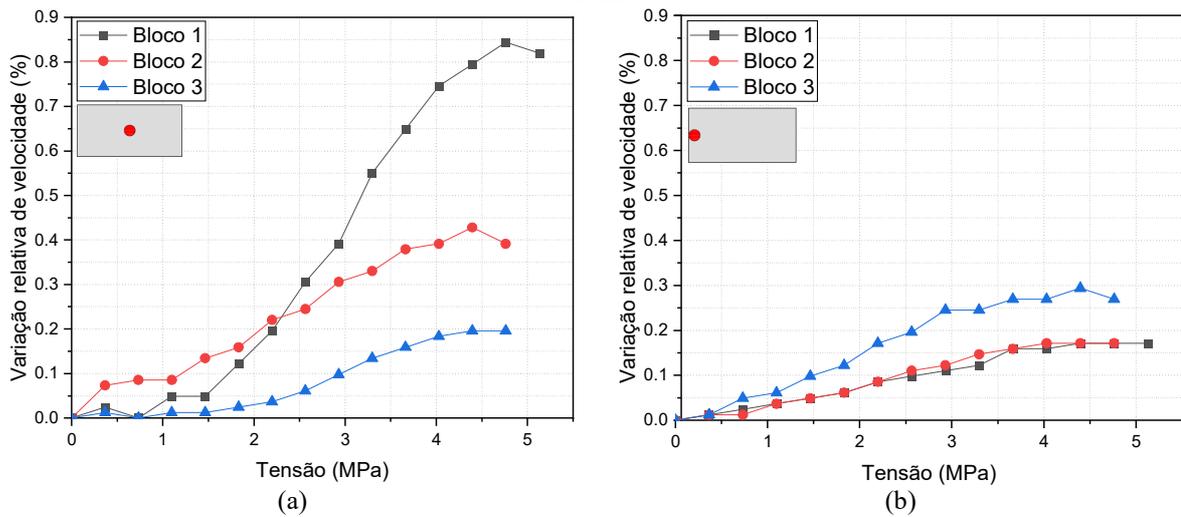


Tabela 4.22 – Coeficientes acustoelásticos dos blocos

Septo	Bloco 1		Bloco 2		Bloco 3	
	A	R ²	A	R ²	A	R ²
Interno	0,198	0,94	0,091	0,97	0,049	0,91
Externo	0,038	0,98	0,042	0,97	0,067	0,95

Fonte: da autora

Figura 4.20 – Variação relativa de velocidade medida em blocos, carregamento : (a) septo interno e (b) septo externo



Os coeficientes mostrados na Tabela 4.22 ressaltam a influência do histórico de carregamento sobre a determinação do efeito acustoelástico no concreto. A diminuição do

carregamento e a conseqüente redução na variação do coeficiente acustoelástico indicam que a avaliação do estado de tensões por meio da VPU tem aplicabilidade restrita em estruturas submetidas a altos carregamentos.

4.10 Estudo da acustoelasticidade em prismas de 2 blocos

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios ultrassônicos realizados em prismas de 2 blocos. O primeiro prisma foi ensaiado com a carga máxima atingindo 400 kN. Durante o ensaio, percebeu-se que havia fissuração visível na amostra (Figura 4.21) e, em alguns pontos, ocorreu perda substancial de amplitude da onda, dificultando a obtenção de resultados válidos.

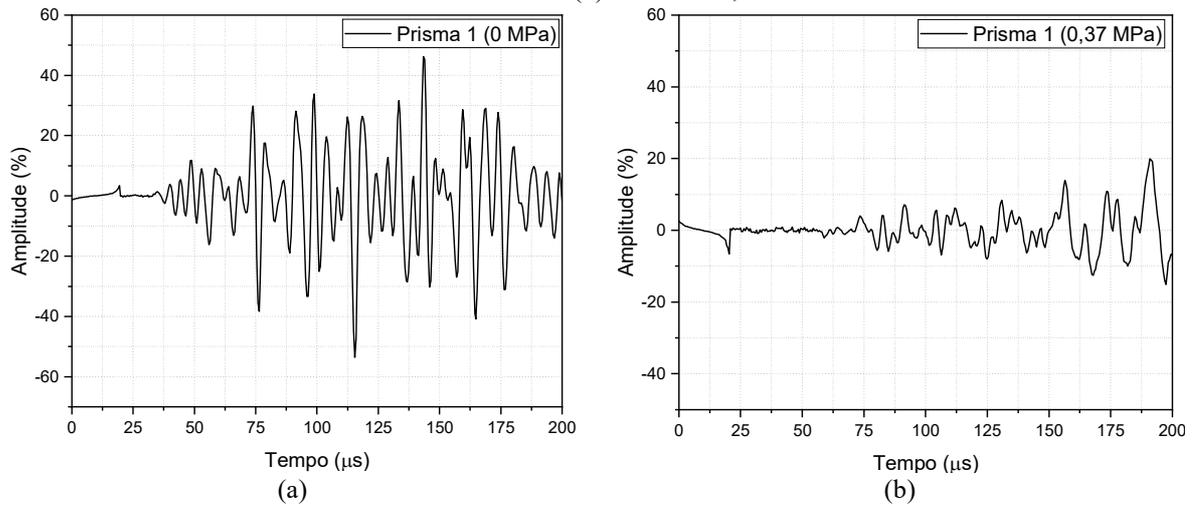
Figura 4.21 – Fissuração no prisma durante ensaio ultrassônico



Fonte: da autora

A fim de evitar que este problema se repetisse em todas as amostras, o carregamento máximo aplicado foi diminuído para 340kN no ensaio subsequente. Para comparação, a Figura 4.22a mostra o sinal obtido em uma onda propagada pelo primeiro prisma descarregado ao fim do ensaio e a Figura 4.22b mostra um sinal obtido no mesmo prisma com uma tensão baixa aplicada. Ambos os sinais foram propagados no septo interno do bloco inferior. É importante salientar ainda que, para a obtenção desses sinais, utilizou-se a configuração de máximo ganho no aparelho de ultrassom. Este ganho corresponde ao aumento da amplitude do sinal após a chegada do transdutor receptor. Uma vez que este ganho é aplicado a todo sinal recebido pelo aparelho de ultrassom, ruídos presentes na medição também podem ser amplificados.

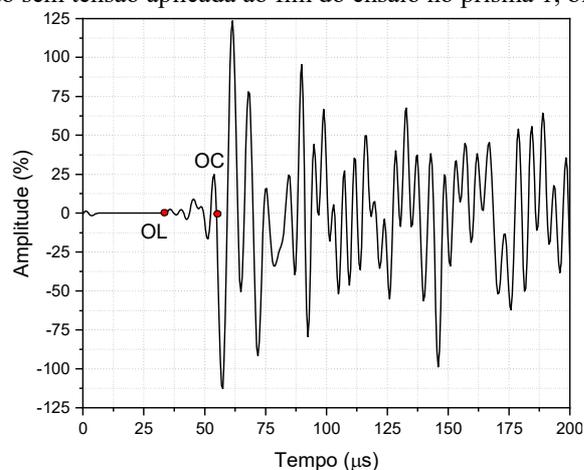
Figura 4.22 – Sinais gravados durante o ensaio no prisma 1, bloco inferior, septo interno: (a) sem tensão aplicada ao fim do ensaio e (b) tensão de 0,37 MPa



Fonte: da autora

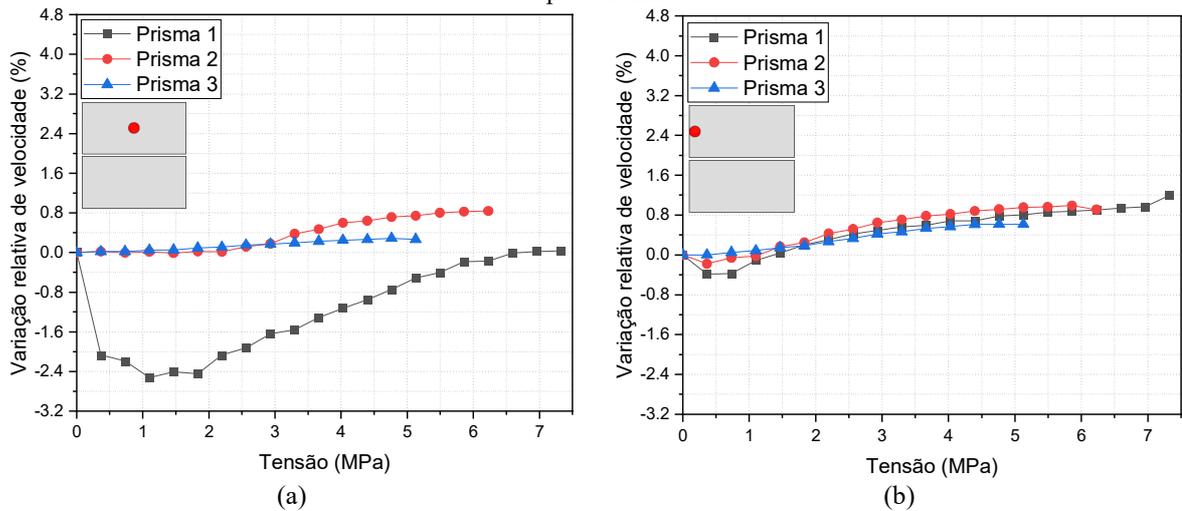
Como pode ser observado, os dois sinais mostrados na Figura 4.22 são muito diferentes entre si. A metodologia de análise de resultados proposta nesse trabalho, que consiste na aplicação da função correlação cruzada para determinar a variação de velocidade entre dois sinais, pressupõe que estes sejam parecidos e que estejam apenas defasados no eixo do tempo. Portanto, a curva acustoelástica não foi calculada nesta região, uma vez que o resultado obtido não seria representativo. Comparando-se ainda estes gráficos com o mostrado na Figura 4.23, gravado no mesmo prisma, mas no septo interno do bloco superior, percebe-se que não é possível identificar claramente a chegada das ondas longitudinais e de cisalhamento na Figura 4.22, o que indica a baixa qualidade do sinal.

Figura 4.23 – Sinal gravado sem tensão aplicada ao fim do ensaio no prisma 1, bloco superior, septo externo



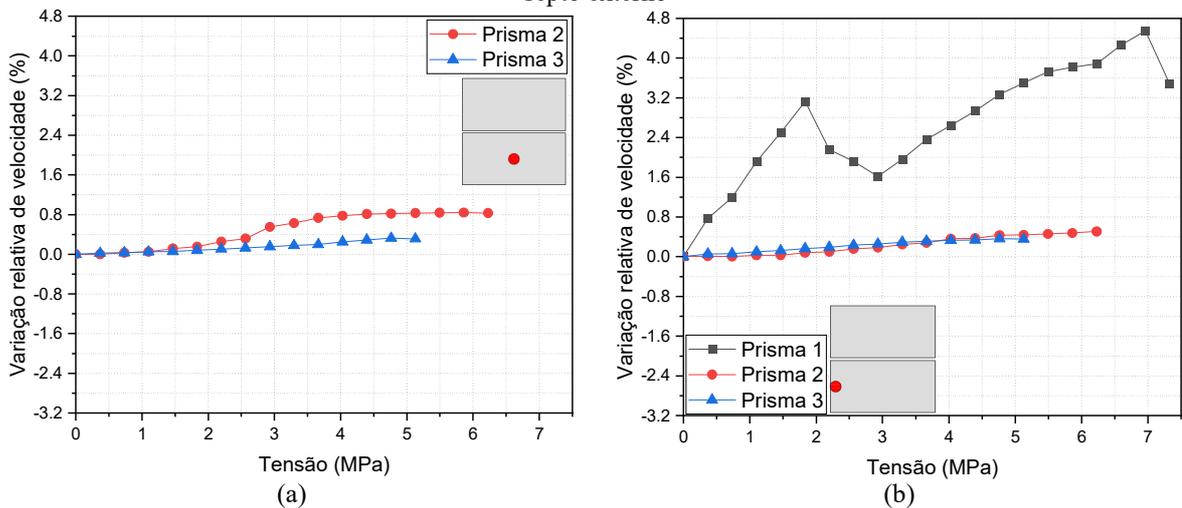
A Figura 4.24 e a Figura 4.25 mostram as variações de velocidade por carregamento aplicado nos prismas de dois blocos. A partir dos gráficos, é possível perceber que os efeitos da danificação no prisma 1 são mais pronunciados no bloco inferior, onde as curvas apresentam comportamento menos uniforme devido à grande fissuração da amostra. Por outro lado, os outros prismas mostraram curvas de comportamento similares em todos os pontos avaliados.

Figura 4.24 – Variação relativa de velocidade em prismas de 2 blocos, bloco superior: (a) septo interno e (b) septo externo



Fonte: da autora

Figura 4.25 – Variação relativa de velocidade em prismas de 2 blocos, bloco inferior: (a) septo interno e (b) septo externo



Fonte: da autora

A partir das curvas mostradas na Figura 4.24 e na Figura 4.25, aplicou-se regressão linear a fim de determinar os coeficientes acustoelásticos (A) e seus coeficientes de determinação R^2 . Estes coeficientes foram determinados apenas para o prisma 2 e para o prisma 3, uma vez que as análises do prisma 1 foram prejudicadas pela fissuração da amostra. A Tabela

4.23 resume os coeficientes encontrados. Os coeficientes acustoelásticos nos prismas de dois blocos variaram entre 0,06 e 0,20.

Tabela 4.23 – Coeficientes acustoelásticos – prismas de 2 blocos

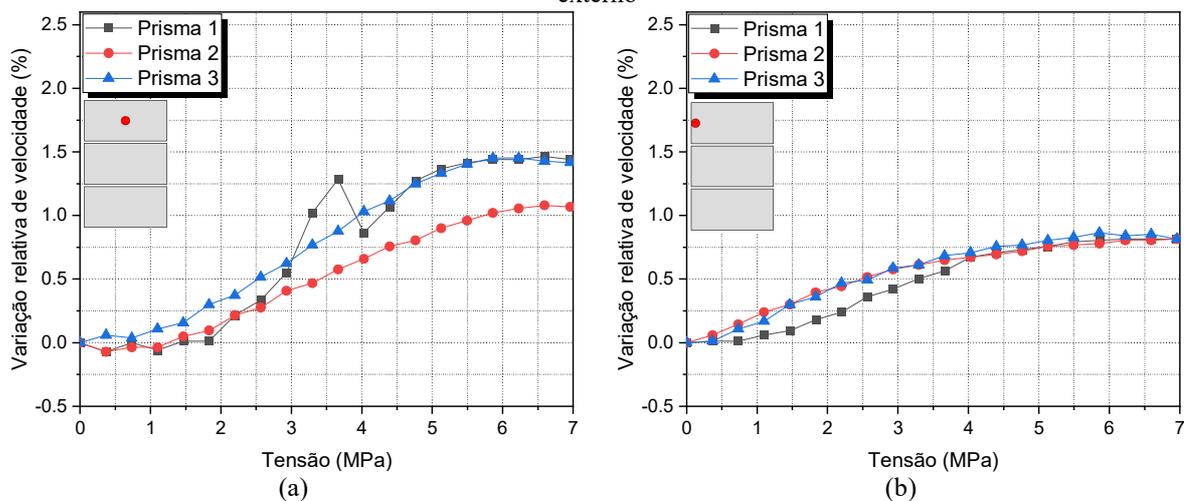
Bloco	Septo	Prisma 2		Prisma 3	
		A	R ²	A	R ²
Superior	Interno	0,17	0,91	0,06	0,98
	Externo	0,20	0,91	0,14	0,98
Inferior	Interno	0,17	0,92	0,07	0,97
	Externo	0,09	0,97	0,07	0,97

Fonte: da autora

4.11 Estudo da acustoelasticidade em prismas de 3 blocos

Foram realizados ensaios em três prismas formados por três blocos. O carregamento máximo aplicado foi de 380 kN e as medidas de Velocidade de Pulso Ultrassônico foram realizadas no descarregamento, com intervalos de 20 kN. As medidas foram realizadas em dois pontos do prisma simultaneamente, sempre nos septos central e externo de um mesmo bloco, sendo necessários portanto treze ciclos de carregamento para realizar o ensaio completo. A seqüência de ensaios ultrassônicos foi realizada partindo do bloco inferior ao superior. As variações de velocidade obtidas são mostradas na Figura 4.26, na Figura 4.27 e na Figura 4.28.

Figura 4.26 – Variação de velocidade nos prismas de 3 blocos – bloco superior: (a) septo interno e (b) septo externo

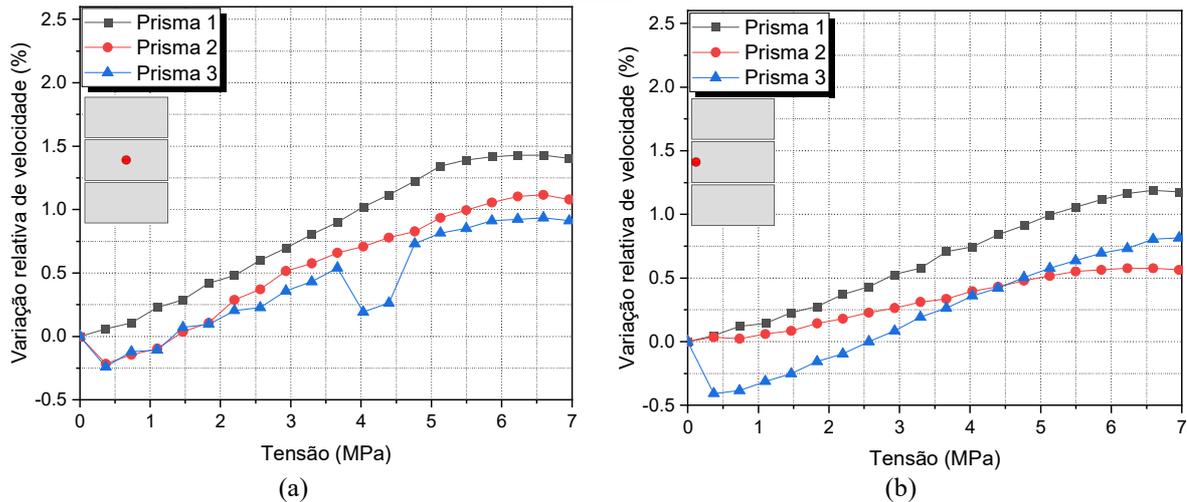


Fonte: da autora

A partir dos resultados obtidos, é possível observar que o comportamento da variação relativa de velocidade com a aplicação de tensão foi mais uniforme nos prismas que nas

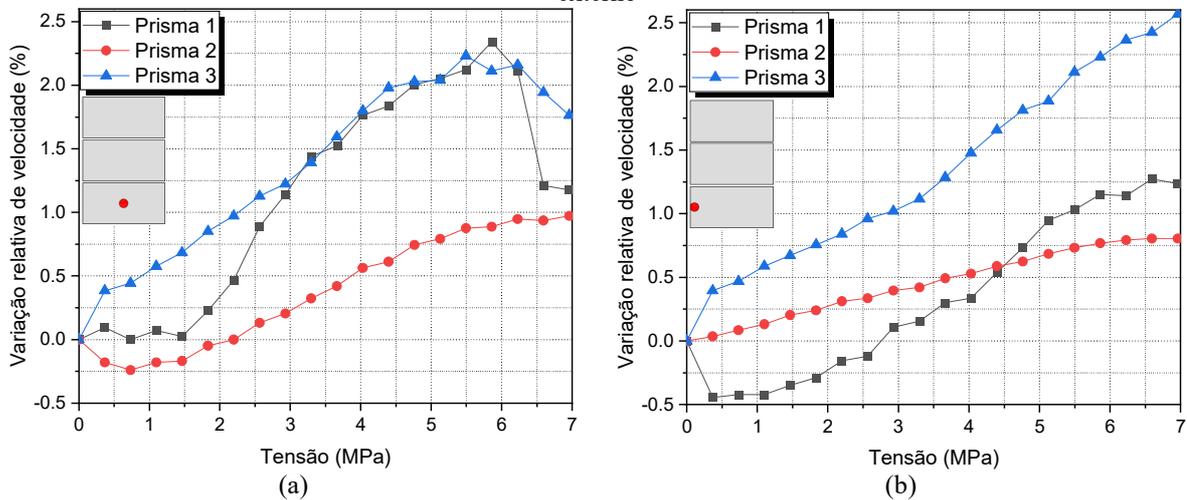
unidades individuais. Anteriormente à avaliação dos resultados, esperava-se que ocorresse o contrário, uma vez que era esperado que a presença da argamassa nos prismas levasse a uma maior variabilidade do elemento. É possível levantar algumas hipóteses a fim de explicar esta uniformidade.

Figura 4.27 – Variação de velocidade nos prismas de 3 blocos – bloco intermediário: (a) septo interno e (b) septo externo



Fonte: da autora

Figura 4.28 – Variação de velocidade nos prismas de 3 blocos – bloco inferior: (a) septo interno e (b) septo externo



Fonte: da autora

Durante o ensaio, as tensões desenvolvidas pelo bloco quando este está inserido no prisma são menores que aquelas aplicadas sobre a unidade isolada. Neste sentido, a fissuração dos blocos inseridos no prisma ocorre de forma localizada, em regiões em que ocorre concentração de tensões. A ruptura dos elementos de alvenaria ocorre a partir do desenvolvimento de tensões de tração nos septos do elemento, onde os ensaios ultrassônicos são realizados. Na unidade, os

dois septos avaliados sofrem danificação; nos prismas, o desenvolvimento das tensões de tração se inicia em um dos blocos e, com o aumento da tensão, se propaga para os outros blocos até a ruína da estrutura. Com o nível de carregamento aplicado nestes ensaios, é provável que apenas um dos blocos do prisma tenha sofrido danificação significativa. Com base na Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28, observa-se que os blocos superior e intermediário dos prismas 1 e 3 apresentam comportamento quase linear. Por outro lado, os blocos inferiores destes dois prismas mostram relações não-lineares entre variação de velocidade e tensão aplicada quando o nível de carregamento é alto. Portanto, acredita-se que apenas estes blocos tenham sofrido efeitos consideráveis de danificação. Esta hipótese é reforçada pela geometria do bloco, que é assentado sobre sua face com septos de menor espessura. Com a concentração de tensão gerada pelas condições de contorno e a redução de seção transversal, é razoável supor que a danificação do prisma será iniciada nesta região. É importante ressaltar que a fissuração visível apresentada por um prisma de dois blocos ocorreu no septo externo do bloco inferior.

Por fim, o prisma 2 apresentou comportamento uniforme em todos os pontos avaliados, assim como os blocos superior e intermediários dos prismas 1 e 3, o que sugere que o carregamento aplicado não gerou danificação significativa nestes pontos avaliados por meio da VPU. Este resultado é significativo, uma vez que as relações lineares permitem a obtenção de coeficientes acustoelásticos representativos de toda a extensão da curva variação de velocidade por tensão aplicada. Os coeficientes acustoelásticos (A) obtidos por regressão linear para cada curva e seus respectivos coeficientes de determinação são listados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Coeficientes acustoelásticos – prismas de 3 blocos

Bloco	Septo	Prisma 1		Prisma 2		Prisma 3	
		A	R ²	A	R ²	A	R ²
Superior	Interno	0,28	0,90	0,19	0,97	0,25	0,96
	Externo	0,14	0,95	0,12	0,91	0,13	0,91
Intermediário	Interno	0,24	0,97	0,21	0,96	0,17	0,89
	Externo	0,19	0,99	0,10	0,98	0,18	0,93
Inferior	Interno	0,33	0,71	0,20	0,94	0,30	0,88
	Externo	0,27	0,91	0,13	0,99	0,35	0,99

Fonte: da autora

A Tabela 4.24 mostra uma grande variação entre os coeficientes acustoelásticos encontrados, com coeficientes variando entre 0,10 e 0,35, com média de 0,21 e coeficiente de

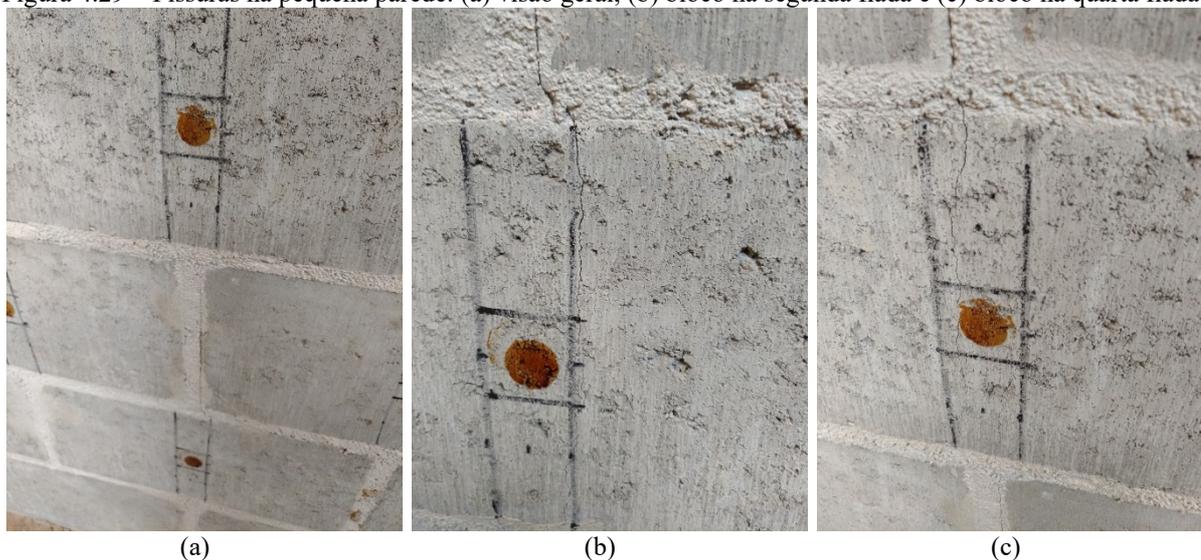
variação de 34,5%. É importante ressaltar os altos coeficientes de determinação gerados pelos dados experimentais, confirmando as relações lineares mencionadas anteriormente. A partir da comparação dos resultados, pode-se considerar que a resposta acustoelástica é praticamente a mesma em prismas de dois ou três blocos.

4.12 Estudo da acustoelasticidade em pequenas paredes

Foram realizados ensaios em três pequenas paredes. O carregamento máximo aplicado correspondeu a 380 kN e as medidas de VPU foram realizadas durante o descarregamento, a cada intervalo de 20 kN. As medidas foram realizadas em dois pontos da parede simultaneamente, sempre nos septos centrais dos blocos, sendo necessários portanto doze ciclos de carregamento para realizar o ensaio completo. Os ensaios ultrassônicos foram realizados nos dois blocos da terceira fiada no 11º ciclo de descarregamento, e nos blocos da segunda e quarta fiadas no 12º ciclo.

Durante os ciclos de pré-carregamento, ocorreram aberturas de fissuras em uma das paredes (nomeada PP3), conforme mostrado na Figura 4.29. Durante o carregamento, a parede sofreu um desvio no seu prumo, o que gerou o aumento da tensão de compressão em um dos lados e conseqüente fissuração.

Figura 4.29 – Fissuras na pequena parede: (a) visão geral, (b) bloco na segunda fiada e (c) bloco na quarta fiada

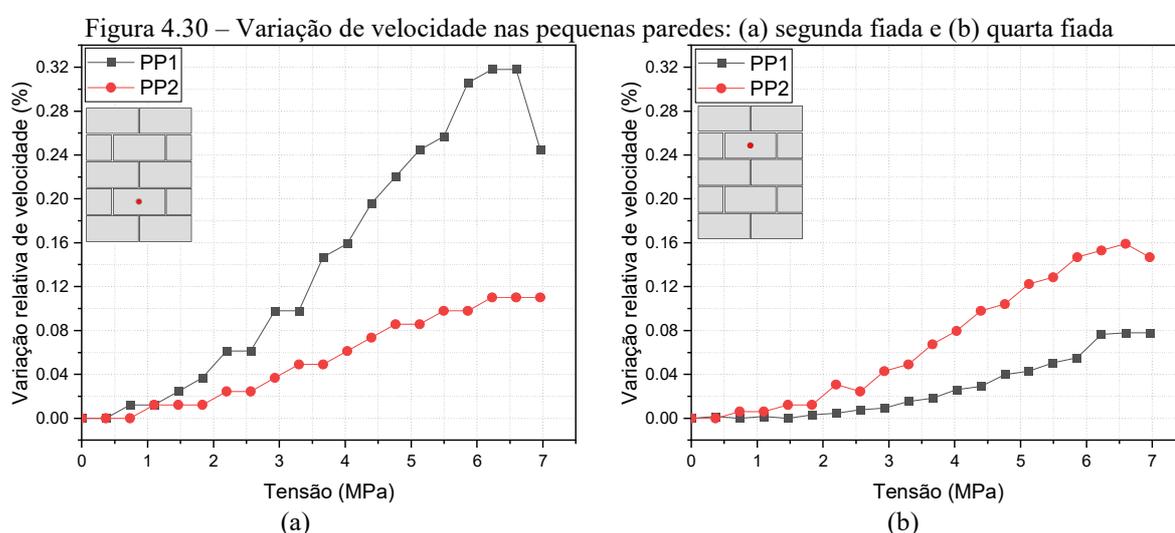


Fonte: da autora

Portanto, para evitar o risco de danificação dos transdutores com a abertura das fissuras, os ensaios de ultrassom nessa parede foram realizados apenas nos blocos da terceira fiada. Além disso, para evitar que a amostra viesse a colapsar durante o experimento, o carregamento

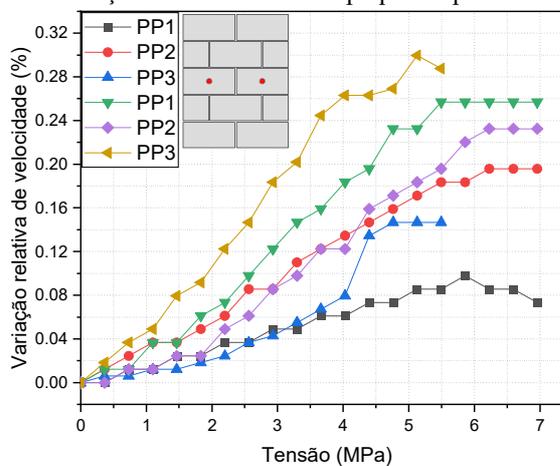
máximo aplicado de 380 kN durante o pré-carregamento foi reduzido para uma carga aplicada máxima de 300 kN durante os ensaios de ultrassom.

As variações relativas de velocidade obtidas nas pequenas paredes são mostradas na Figura 4.30 e na Figura 4.31. Os coeficientes acustoelásticos são mostrados na Tabela 4.25, com valor médio de 0,033 e coeficiente de variação de 44,8%. Considerando apenas os blocos na terceira fiada, encontramos um coeficiente acustoelástico médio de 0,038, com coeficiente de variação de 36%. Os coeficientes encontrados para as paredes foram cerca de dez vezes menores que os valores encontrados em prismas. Por outro lado, apresentam a mesma ordem de grandeza encontrada nos septos externos dos blocos com carregamento reduzido (Tabela 4.22).



Fonte: da autora

Figura 4.31 – Variação de velocidade nas pequenas paredes: terceira fiada



Fonte: da autora

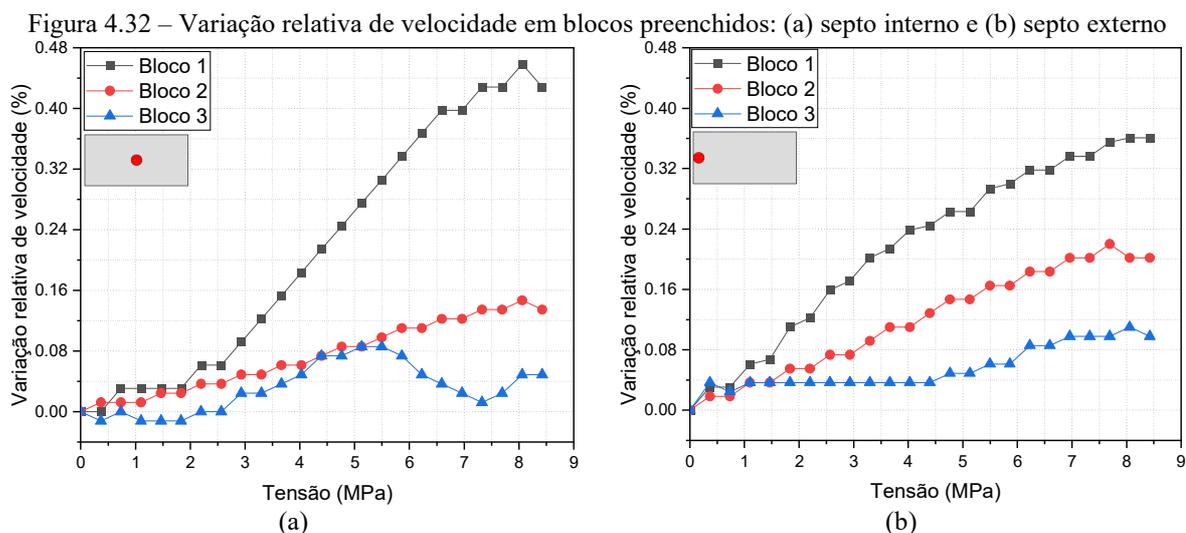
Tabela 4.25 – Coeficientes acustoelásticos – pequenas paredes

	PP1		PP2		PP3	
	A	R ²	A	R ²	A	R ²
2ª fiada	0,051	0,94	0,019	0,98	-	-
3ª fiada	0,014	0,92	0,031	0,98	0,039	0,98
3ª fiada	0,044	0,97	0,039	0,98	0,059	0,98
4ª fiada	0,012	0,89	0,026	0,96	-	-

Fonte: da autora

4.13 Estudo da acustoelasticidade em blocos preenchidos

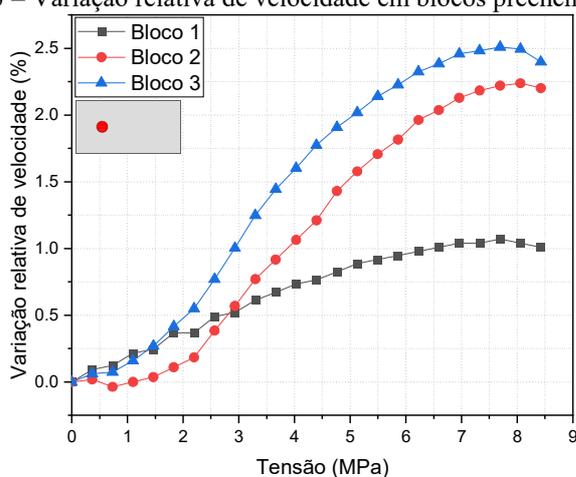
A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir da avaliação de três blocos preenchidos com graute. A carga máxima aplicada neste ensaio foi de 460 kN, correspondente a cerca de 50% da resistência à compressão característica dos blocos preenchidos. As variações de velocidade medidas com a aplicação de tensão nos septos dos blocos e na região preenchida são mostradas na Figura 4.32 e na Figura 4.33.



Fonte: da autora

A introdução do preenchimento aumenta a complexidade do comportamento da estrutura formada por bloco e graute. Nesse sentido, é normal que ocorra uma maior flutuação dos resultados de variação relativa de velocidade nos elementos preenchidos, uma vez que a distribuição de tensão entre bloco e graute varia entre amostras. A Figura 4.32 e a Figura 4.33 mostram que a amostra com maior variação de velocidade no bloco no bloco apresentou menor influência da acustoelasticidade no graute (Bloco 1) e que o contrário também é verdadeiro (Bloco 3).

Figura 4.33 – Variação relativa de velocidade em blocos preenchidos: graute



Fonte: da autora

Dada a presença da interface, se torna necessário verificar se a onda se propaga pelo graute ou se sofre desvios e é propagada apenas pelo bloco. As velocidades medidas nos blocos grauteados íntegros são mostradas na Tabela 4.26 e na Tabela 4.27. Os valores mostrados na Tabela 4.26 foram obtidos pela divisão da distância entre os transdutores (0,14 m) pelo tempo de chegada de ondas longitudinais e de cisalhamento, determinados com o auxílio da ferramenta computacional desenvolvida por Schiavon (2015). A Tabela 4.27 apresenta a média desses valores. Conforme esperado, as velocidades medidas na região preenchida são sempre menores que as medidas nas paredes dos blocos.

Tabela 4.26 – Velocidade de propagação nos blocos grauteados

	Velocidade de ondas longitudinais (m/s)			Velocidade ondas de cisalhamento (m/s)		
	Septo interno	Septo externo	Graute	Septo interno	Septo externo	Graute
Bloco 1	4485,7	4492,9	4086,4	2719,5	2710,5	2574,9
Bloco 2	4490,1	4402,5	4392,8	2714,8	2652,5	2552,4
Bloco 3	4662,0	4455,8	3834,6	2787,2	2675,8	2568,3

Fonte: da autora

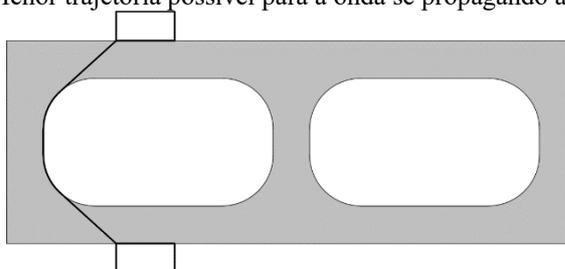
Tabela 4.27 – Velocidade média nos septos e graute dos blocos grauteados

	Ondas longitudinais			Ondas de cisalhamento		
	Velocidade média (m/s)	Tempo de chegada (μ s)	CV (%)	Velocidade média (m/s)	Tempo de chegada (μ s)	CV (%)
Septos	4498,2 m/s	31,12	1,77%	2710,1 m/s	51,66	1,54%
Graute	4104,6 m/s	34,11	5,56%	2565,2 m/s	54,58	0,37%

Fonte: da autora

A diferença de velocidade entre septos e graute se relaciona à diminuição da VPU quando a onda atravessa a interface entre graute e bloco. Se ocorrer uma redução elevada de velocidade nesta interface, é possível que a trajetória de propagação mais rápida para o pulso ultrassônico atravessasse apenas o bloco, como exemplificado na Figura 4.34.

Figura 4.34 – Menor trajetória possível para a onda se propagando apenas pelo bloco



Fonte: da autora

A trajetória mostrada na Figura 4.34 tem comprimento de 18,06 cm. Considerando a velocidade da onda longitudinal no bloco igual à velocidade média nos septos (4498,2 m/s, conforme mostrado na Tabela 4.27), o pulso percorrendo esta trajetória teria tempo de chegada igual a 40,14 μ s. Portanto, em todas as avaliações de elementos preenchidas, o tempo de chegada de ondas propagadas na região do graute será verificado a fim de garantir que este valor é menor que 40,14 μ s. Se o tempo de chegada for superior a este valor de referência, é provável que a onda não esteja percorrendo o preenchimento do bloco.

Por simplificação, este valor de tempo de referência será transformado em velocidade de referência. A distância direta entre transdutores é 14 cm, logo, uma onda que leva 40,14 μ s para percorrer esta trajetória apresenta uma velocidade de 3486,9 m/s. Portanto, adotou-se como referência a velocidade mínima de 3500 m/s para garantir que a onda se propaga pelo preenchimento.

A Tabela 4.28 mostra os coeficientes acustoelásticos encontrados para os blocos preenchidos. Assim como pode ser observado na Figura 4.32 e na Figura 4.33, as regiões preenchidas com graute apresentam maiores coeficientes acustoelásticos em comparação às paredes do bloco. Na região preenchida, a onda se propaga por bloco, interface e graute. Além do efeito acustoelástico interferindo diretamente sobre a onda, a tensão aplicada e consequente deformação dos elementos altera o contato entre bloco e graute na interface. Portanto, é esperado que o comportamento da curva acustoelástica nessa região tenha uma magnitude maior e tenha previsão mais difícil que no bloco.

Tabela 4.28 – Coeficientes acustoelásticos – blocos grauteados

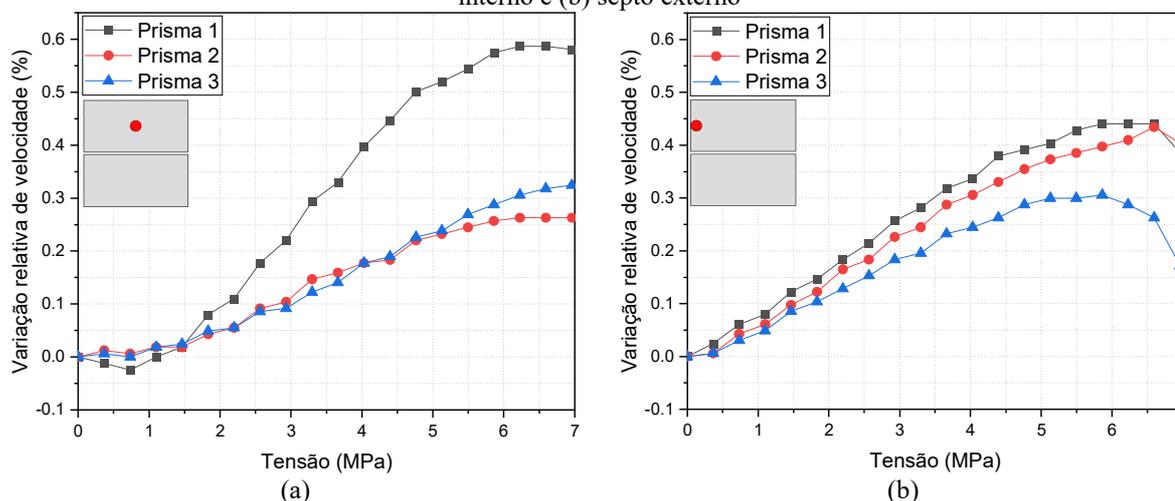
Região	Bloco 1		Bloco 2		Bloco 3	
	A	R ²	A	R ²	A	R ²
Septo interno	0,062	0,97	0,018	0,99	0,008	0,38
Septo externo	0,045	0,97	0,027	0,98	0,010	0,84
Graute	0,13	0,94	0,33	0,97	0,35	0,95

Fonte: da autora

4.14 Estudo da acustoelasticidade em prismas de dois blocos preenchidos

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da avaliação de três prismas de dois blocos preenchidos com graute. Nestes ensaios, aplicou-se uma carga máxima de 380 kN, correspondente a cerca de 50% da resistência à compressão característica do prisma. As variações de velocidade medidas com a aplicação de tensão nos septos dos blocos são mostradas na Figura 4.35 e na Figura 4.36. Com exceção da variação relativa de velocidade observada no septo externo do prisma 2, os resultados nos septos dos blocos inseridos em prismas grauteados apresentaram boa concordância entre as amostras. Os coeficientes acustoelásticos dos prismas preenchidos são mostrados na Tabela 4.29.

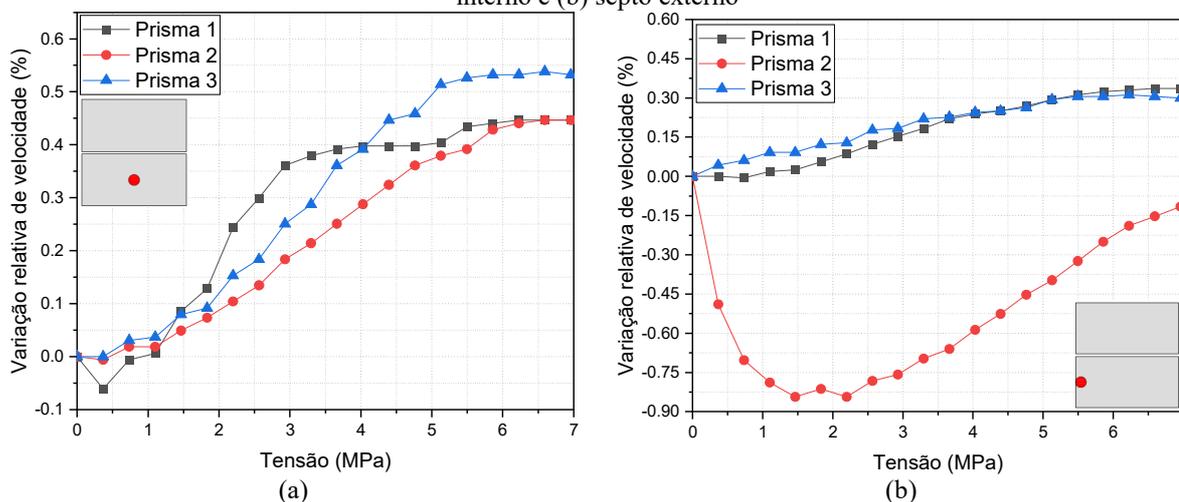
Figura 4.35– Variação relativa de velocidade em prismas preenchidos de 2 blocos, bloco superior: (a) septo interno e (b) septo externo



A curva acustoelástica obtida no septo externo do prisma 2 apresentou um comportamento anômalo, com uma grande queda de velocidade para tensões aplicadas de até 3 MPa e aumento de velocidade a partir deste carregamento. Lembrando que as medidas são feitas durante o descarregamento da amostra, é possível que a diminuição da tensão aplicada promova o fechamento de microfissuras. Neste sentido, podemos supor que, conforme a tensão aplicada

diminuía, abaixo de 2 MPa, a velocidade nesta região aumentou devido à diminuição da microfissuração e, nesta medida, este efeito foi preponderante sobre a variação relativa de velocidade.

Figura 4.36 – Variação relativa de velocidade em prismas preenchidos de 2 blocos, bloco inferior: (a) septo interno e (b) septo externo



Fonte: da autora

Tabela 4.29 – Coeficientes acustoelásticos – prismas de 2 blocos preenchidos

Bloco	Septo	Prisma 1		Prisma 2		Prisma 3	
		A	R ²	A	R ²	A	R ²
Superior	Interno	0,107	0,96	0,046	0,97	0,053	0,98
	Externo	0,068	0,94	0,067	0,97	0,043	0,78
Inferior	Interno	0,077	0,84	0,077	0,98	0,094	0,96
	Externo	0,059	0,97	0,066	0,28	0,045	0,95

Fonte: da autora

A fim de analisar o efeito acustoelástico na região preenchida, foi necessário verificar a velocidade das ondas nessa região para garantir que a propagação ocorreu pelo graute e não apenas pelo bloco. Conforme descrito no item anterior, considerou-se que a velocidade mínima de ondas longitudinais se propagando pelo graute deve ser de 3500 m/s. As velocidades medidas no graute dos prismas preenchidos de dois blocos são mostradas na Tabela 4.30.

A partir destes valores, os resultados obtidos no bloco inferior do Prisma 2 foram descartados. Embora a VPU medida no bloco superior do Prisma 2 também esteja abaixo do limite estabelecido, a diferença corresponde a apenas 2,15%. Portanto, dada a pequena diferença e considerando-se que este limite é apenas uma estimativa, gerou-se a curva

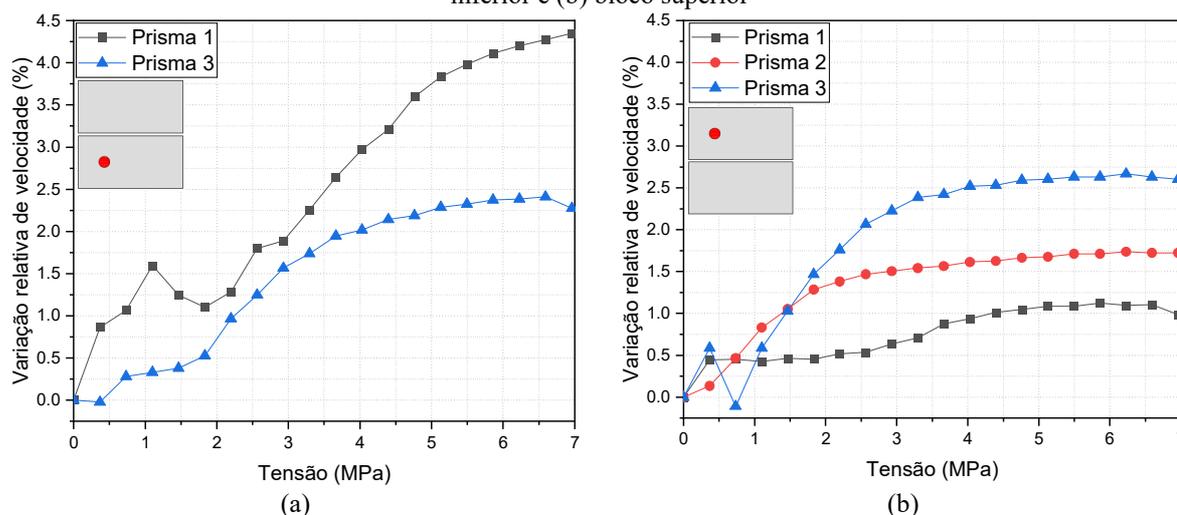
acustoelástica neste bloco para comparação com os outros prismas. As curvas são mostradas na Figura 4.37 e os coeficientes acustoelásticos são mostrados na Tabela 4.31.

Tabela 4.30 – Velocidade de propagação nos prismas preenchidos de dois blocos

	Velocidade ondas longitudinais (m/s)		Velocidade ondas de cisalhamento (m/s)	
	Graute (bloco inferior)	Graute (bloco superior)	Graute (bloco inferior)	Graute (bloco superior)
Prisma 1	3771,5	3533,6	2638,0	2568,8
Prisma 2	2963,0	3424,7	1251,0	2568,3
Prisma 3	3604,5	3632,6	2503,1	2590,2

Fonte: da autora

Figura 4.37 – Variação relativa de velocidade em prismas de 2 blocos preenchidos, região preenchida: (a) bloco inferior e (b) bloco superior



Fonte: da autora

Tabela 4.31 – Coeficientes acustoelásticos – prismas de 2 blocos preenchidos (região do preenchimento)

Bloco	Prisma 1		Prisma 2		Prisma 3	
	A	R ²	A	R ²	A	R ²
Superior	0,14	0,87	0,21	0,73	0,39	0,79
Inferior	0,62	0,96			0,40	0,91

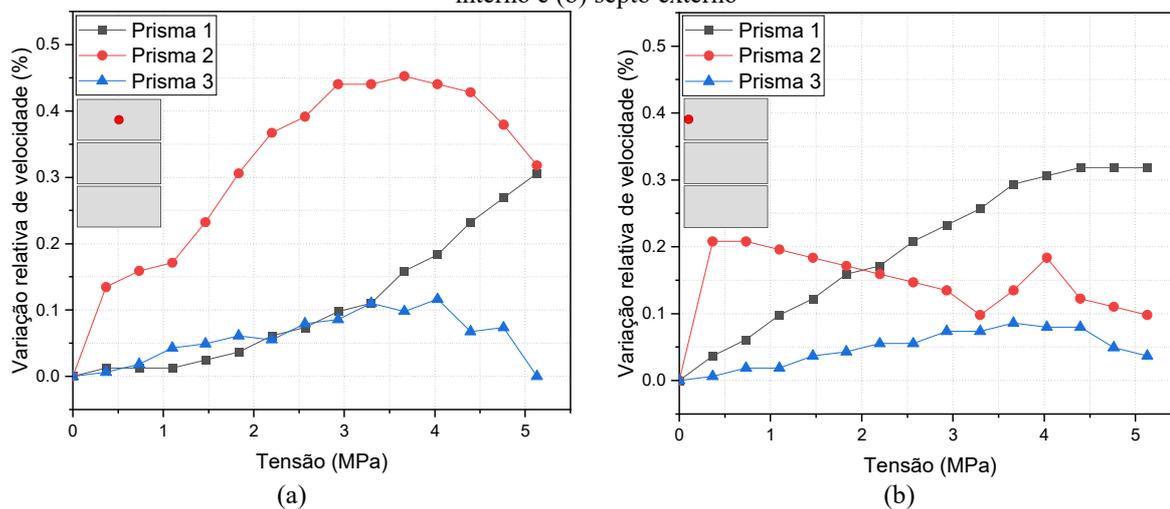
Fonte: da autora

4.15 Estudo da acustoelasticidade em prismas de três blocos preenchidos

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir da avaliação de três prismas de três blocos preenchidos com graute. A carga máxima aplicada neste ensaio foi de 280 kN,

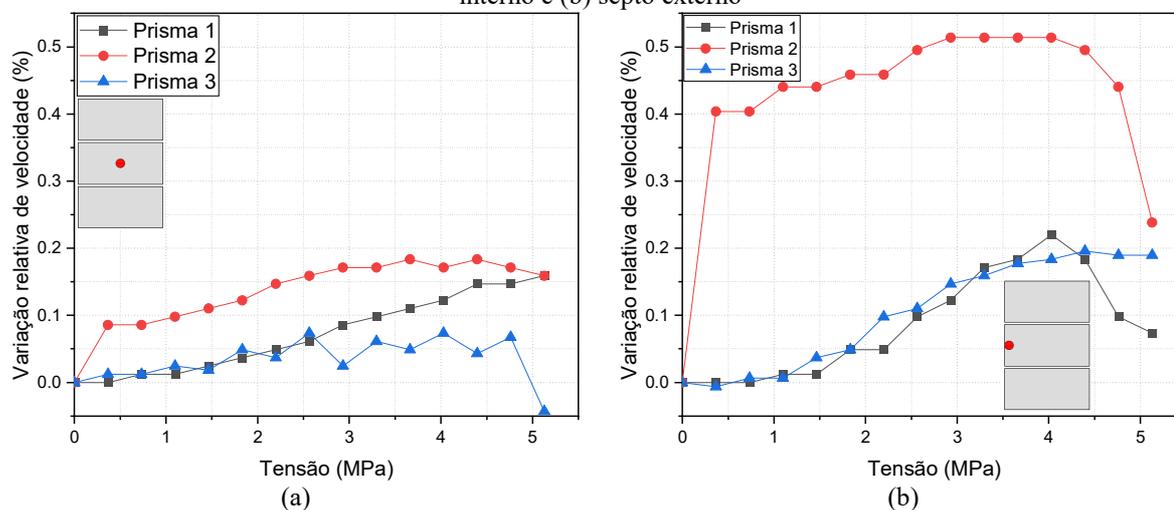
correspondente a cerca de 50% da resistência à compressão característica do prisma. As variações de velocidade medidas com a aplicação de tensão nos septos dos blocos e na região preenchida são mostradas na Figura 4.38 a Figura 4.40.

Figura 4.38 – Variação relativa de velocidade em prismas de 3 blocos preenchidos, bloco superior: (a) septo interno e (b) septo externo



Fonte: da autora

Figura 4.39 – Variação relativa de velocidade em prismas de 3 blocos preenchidos, bloco intermediário: (a) septo interno e (b) septo externo

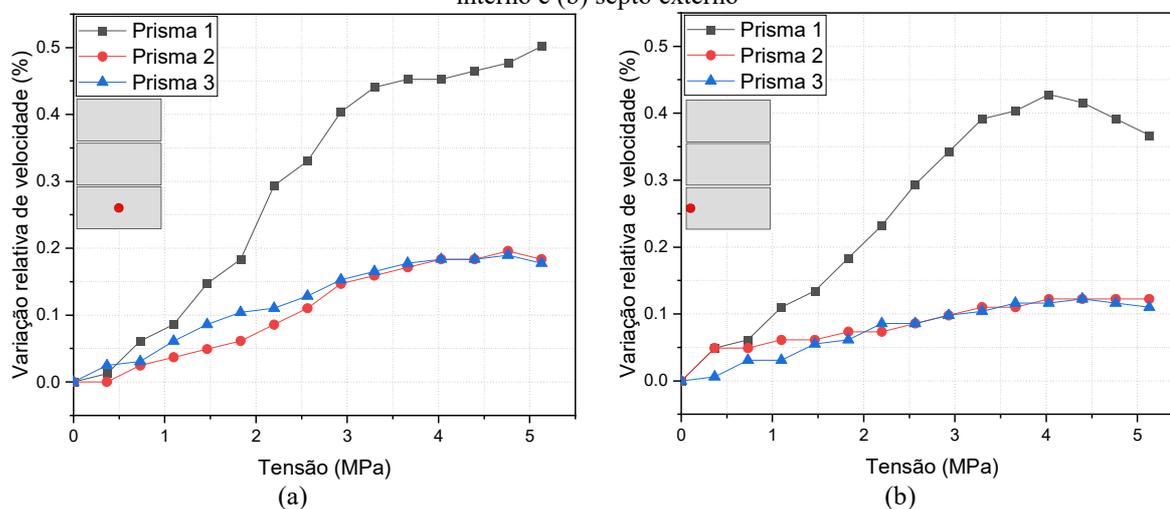


Fonte: da autora

Comparando os resultados obtidos nos blocos e prismas de dois e três blocos preenchidos com graute, observa-se que os últimos apresentaram maior variação entre as amostras. É possível que a variação nos resultados seja causada por má distribuição dos esforços entre graute e bloco nos prismas maiores. Conforme o tamanho dos elementos aumenta, aumenta também o volume de graute necessário para o seu preenchimento. Com isso, a retração

total do preenchimento também é maior e a deformação impede que os dois materiais sejam carregados simultaneamente pela compressão aplicada.

Figura 4.40 – Variação relativa de velocidade em prismas de 3 blocos preenchidos, bloco inferior: (a) septo interno e (b) septo externo



Fonte: da autora

Por outro lado, para níveis mais altos de tensão, a variação de velocidade nos septos do prisma preenchido foi bem inferior à medida no prisma oco com o mesmo nível de carregamento, mesmo com as duas estruturas tendo resistência à compressão característica similares (9,69 MPa para o prisma oco e 10,43 MPa para o prisma preenchido). Este resultado indica que o graute absorveu parte da tensão aplicada.

Os coeficientes acustoelásticos medidos nos septos dos prismas de três blocos são mostrados na Tabela 4.32. Nessas estruturas, alguns dos coeficientes acustoelásticos calculados são pouco significativos, uma vez que a relação entre tensão aplicada e variação relativa de velocidade não foi linear.

Tabela 4.32 – Coeficientes acustoelásticos – prismas de 3 blocos preenchidos

		Prisma 1		Prisma 2		Prisma 3	
Bloco	Septo	A	R ²	A	R ²	A	R ²
Superior	Interno	0,059	0,91	0,069	0,66	0,012	0,26
	Externo	0,066	0,97	-0,0068	0,04	0,013	0,55
Intermediário	Interno	0,034	0,98	0,027	0,74	0,0047	0,06
	Externo	0,036	0,59	0,029	0,13	0,047	0,94
Inferior	Interno	0,11	0,94	0,043	0,96	0,038	0,93
	Externo	0,088	0,90	0,021	0,91	0,024	0,90

Fonte: da autora

Para a avaliação do efeito acustoelástico na região preenchida do bloco, verificou-se novamente a velocidade de propagação nesta região em cada um dos blocos, conforme mostrado na Tabela 4.33.

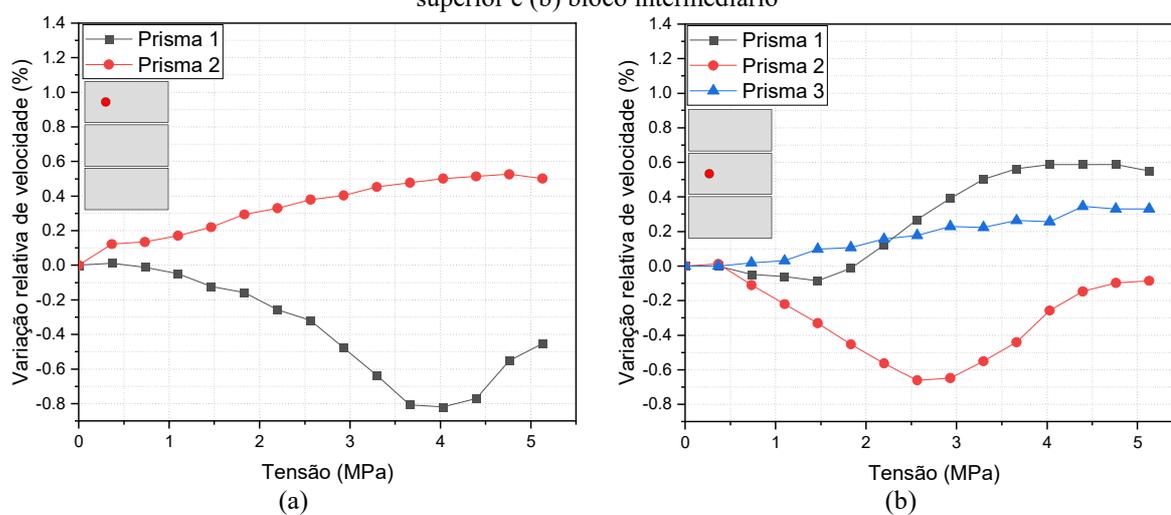
Tabela 4.33 – Velocidade de propagação nos prismas preenchidos de três blocos

Bloco em que foi realizada a medida no preenchimento	Velocidade de ondas longitudinais (m/s)			Velocidade de ondas de cisalhamento (m/s)		
	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3
	Bloco superior	3527,3	3582,4	3349,3	2568,8	2558,0
Bloco intermediário	3550,6	3551,5	3718,5	2590,2	2505,8	2536,2
Bloco inferior	3511,4	3703,7	3357,3	2512,1	2503,6	2411,7

Fonte: da autora

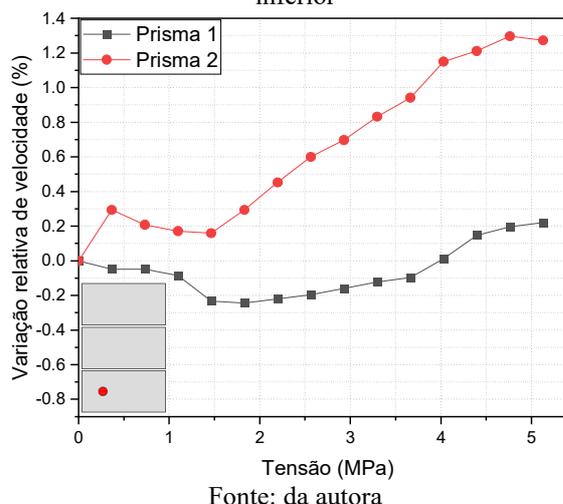
Os resultados obtidos na região preenchida dos blocos superior e inferior do Prisma 3 foram desconsiderados devido à baixa velocidade de propagação. Embora a VPU nos outros prismas tenha se mantido acima do limite arbitrado de 3500 m/s, é importante ressaltar que as velocidades registradas foram baixas. Logo, considerando que esse limite é estimado, ainda pode haver curvas na Figura 4.41 e na Figura 4.42 em que a trajetória da onda se desviou do preenchimento.

Figura 4.41 – Variação relativa de velocidade em prismas de 3 blocos preenchidos, região preenchida: (a) bloco superior e (b) bloco intermediário



Fonte: da autora

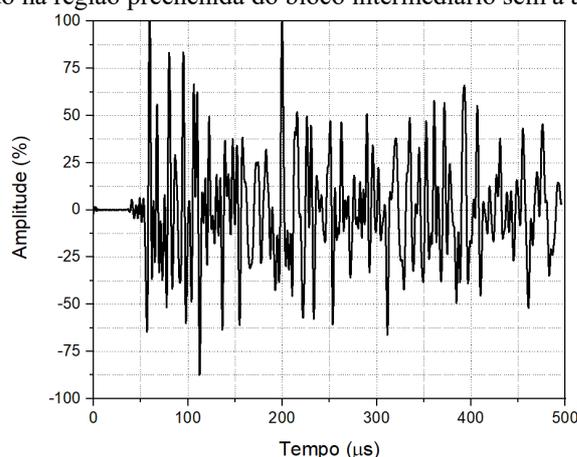
Figura 4.42 – Variação relativa de velocidade em prismas de 3 blocos preenchidos, região preenchida: bloco inferior



Como pode ser observado na Figura 4.41 e na Figura 4.42, o comportamento da curva acustoelástica na região do preenchimento apresenta duas tendências: uma curva similar à do concreto ou uma parábola côncava (ou uma combinação de ambos, como no bloco intermediário do prisma 1). É provável que esta variação esteja relacionada ao preenchimento do graute e à solidarização dos esforços. Embora o graute tenha sido compactado durante o preenchimento dos blocos, é possível que a aderência não tenha sido perfeita ao longo de toda a altura do bloco, fazendo com que a deformação do graute não acompanhe a deformação do bloco e gerando movimentação na interface. Conforme o carregamento aumenta e dos materiais se deformam lateralmente, o contato entre eles aumenta e a acustoelasticidade volta a ser o fenômeno preponderante sobre a variação de velocidade.

A Figura 4.43 mostra um sinal obtido na região preenchida do bloco intermediário anteriormente à aplicação de carregamento no prisma. Um sinal de boa qualidade, como mostrado na Figura 4.19, apresenta maiores amplitudes na região da chegada da onda de cisalhamento, ocorrendo uma diminuição exponencial da amplitude com o tempo. Na Figura 4.19, em 200 μ s, a amplitude do sinal já corresponde a 25% do máximo registrado na chegada da onda. No sinal gravado na região do graute, em 500 μ s, a queda na amplitude foi de apenas cerca de 50% do seu valor máximo. Além disso, a configuração do “ganho”, ou fator de multiplicação do sinal, no aparelho de ultrassom foi aumentada de 2x nos septos para 50x na região do graute. Estes aspectos indicam a baixa qualidade do sinal obtido experimentalmente, indicando que a avaliação da acustoelasticidade deve ser feita preferencialmente nos septos.

Figura 4.43 – Sinal obtido na região preenchida do bloco intermediário sem a aplicação de carregamento



Fonte: da autora

Os coeficientes acustoelásticos obtidos na região do preenchimento nos prismas de três blocos são mostrados na Tabela 4.34. Os coeficientes foram calculados para todas as curvas mostradas na Figura 4.41 e na Figura 4.42. Entretanto, ressalta-se que nas curvas com comportamento de parábola côncava, o coeficiente não é representativo uma vez que a relação entre tensão e variação de velocidade não foi linear.

Tabela 4.34 – Coeficientes acustoelásticos – prismas de 3 blocos preenchidos (região do preenchimento)

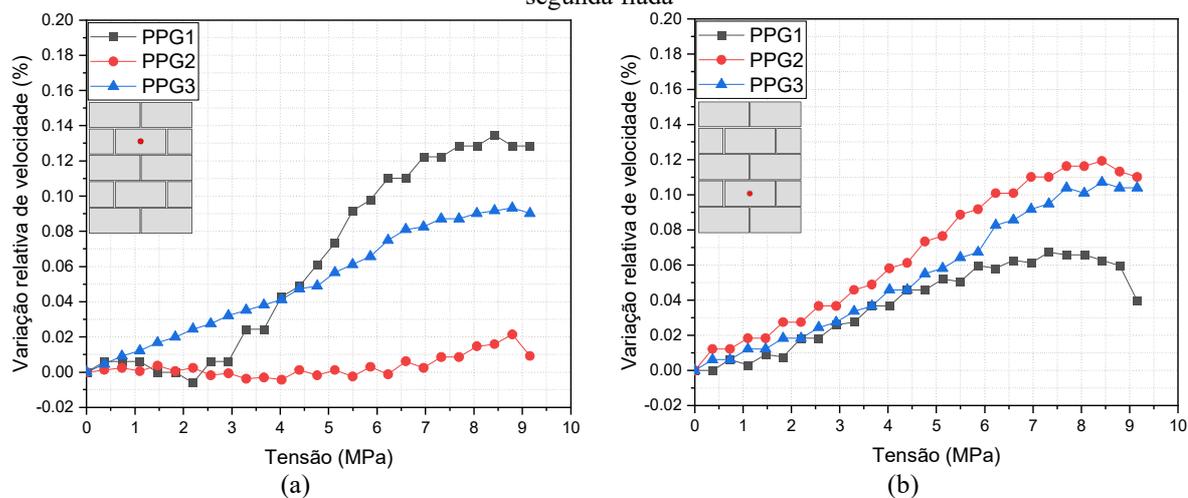
Bloco	Prisma 1		Prisma 2		Prisma 3	
	A	R ²	A	R ²	R ²	A
Superior	-0,16	0,75	0,10	0,94		
Intermediário	0,16	0,86	-0,021	0,02	0,074	0,97
Inferior	0,05	0,29	0,27	0,94		

Fonte: da autora

4.16 Estudo da acustoelasticidade em pequenas paredes preenchidas

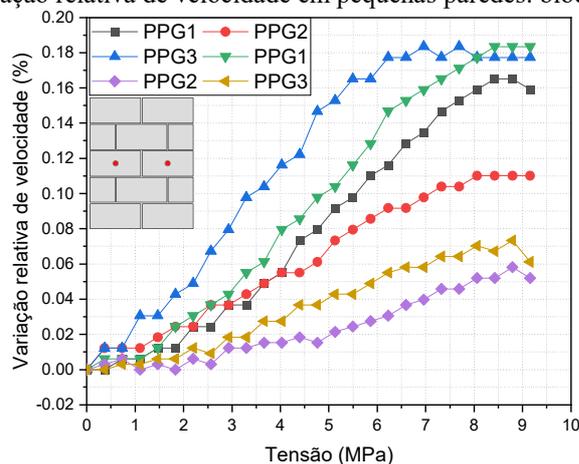
A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir da avaliação de três pequenas paredes preenchidas com graute. A carga máxima aplicada neste ensaio foi de 500 kN, correspondente a cerca de 50% da resistência à compressão característica da parede. As variações de velocidade medidas com a aplicação de tensão nos septos dos blocos são mostradas na Figura 4.44 e na Figura 4.45. Os coeficientes acustoelásticos de cada curva estão listados na Tabela 4.35.

Figura 4.44 – Variação relativa de velocidade em pequenas paredes: (a) blocos de quarta fiada e (b) blocos de segunda fiada



Fonte: da autora

Figura 4.45 – Variação relativa de velocidade em pequenas paredes: blocos de terceira fiada



Fonte: da autora

Tabela 4.35 – Coeficientes acustoelásticos – pequenas paredes preenchidas

Posição do bloco	Parede 1		Parede 2		Parede 3	
	A	R ²	A	R ²	A	R ²
4 ^a fiada	0,018	0,92	0,0015	0,42	0,011	0,98
3 ^a fiada	0,018	0,98	0,013	0,98	0,013	0,92
3 ^a fiada	0,023	0,98	0,0066	0,94	0,0089	0,97
2 ^a fiada	0,0077	0,84	0,014	0,97	0,013	0,98

Fonte: da autora

Considerando apenas os blocos de 4^a fiada, os coeficientes acustoelásticos apresentam o valor médio 0,010 e coeficiente de variação 81,5%; na terceira fiada, a média é 0,014 e o coeficiente de variação é 0,44; na segunda fiada, a média é 0,012 e o coeficiente de variação corresponde a 29,3%. Embora ocorra uma grande dispersão nos valores dos coeficientes

acustoelásticos, as médias se mantiveram próximas em todas as fiadas medidas e o coeficiente de variação diminuiu progressivamente nas fiadas mais baixas. Nas paredes, ocorre a uniformização da compressão aplicada verticalmente. Logo, é possível que a menor variabilidade seja decorrente deste efeito nas pequenas paredes, em que pequenas variações de alinhamento na aplicação da carga teriam uma influência menor sobre a tensão em pontos mais baixos.

Embora não tenha sido possível observar esta uniformização nas paredes sem preenchimento, a ausência do graute diminui a inércia destas paredes em relação às preenchidas e, portanto, gera maior deformação devido a excentricidade no carregamento. Neste sentido, ocorrem maiores tensões de segunda ordem devido à flexão e as variações de tensão tendem a ser maiores em blocos mais baixos.

Não foram realizados ensaios de ultrassom na primeira fiada das paredes, entretanto, dado que o contato da parede com a base de apoio modifica o campo de tensões nesta região, é esperado que o melhor lugar para a avaliação de tensões em paredes seja nos blocos da segunda fiada.

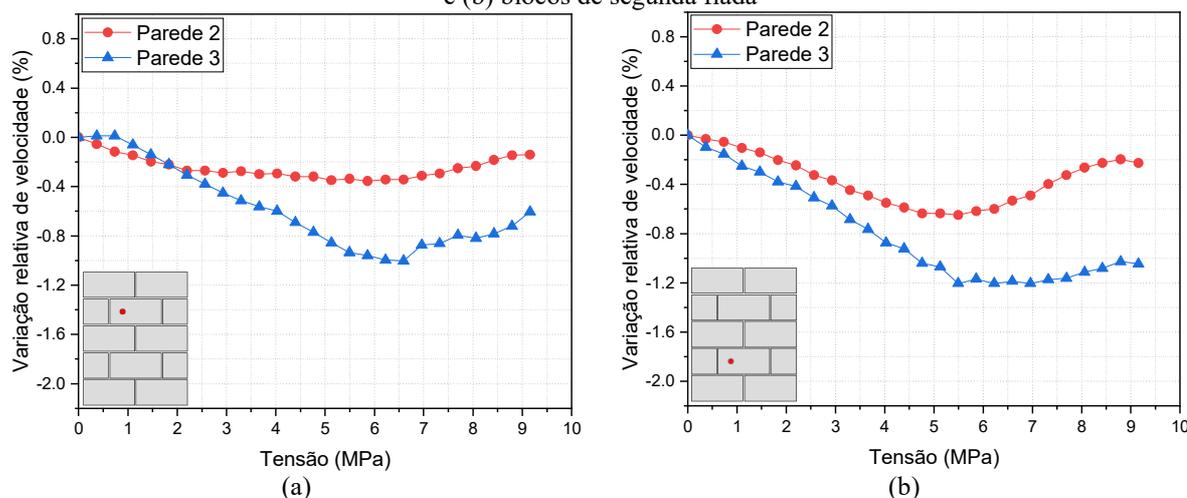
As velocidades de propagação medidas na região preenchida são mostradas na Tabela 4.36. A partir destes resultados, foram desconsideradas as curvas obtidas na 2ª fiada e na 4ª fiada da Parede 1, assim como uma das curvas obtidas na 3ª fiada da Parede 3. As curvas acustoelásticas restantes são mostradas na Figura 4.46 e na Figura 4.47.

Tabela 4.36 – Velocidade de propagação nas pequenas paredes

Fiada em que foi realizada a medida no preenchimento	Velocidade de ondas longitudinais (m/s)			Velocidade de ondas de cisalhamento (m/s)		
	Parede	Parede	Parede	Parede 1	Parede 2	Parede 3
	1	2	3			
4ª fiada	3412,1	3662,0	3857,8	1263,0	2583,5	2501,8
3ª fiada	4291,8	3741,3	3500,9	2737,0	2625,2	2594,5
3ª fiada	4443,0	3556,9	3766,5	2684,0	2585,9	2473,5
2ª fiada	2619,8	3962,6	3700,8	1122,7	2567,4	2495,5

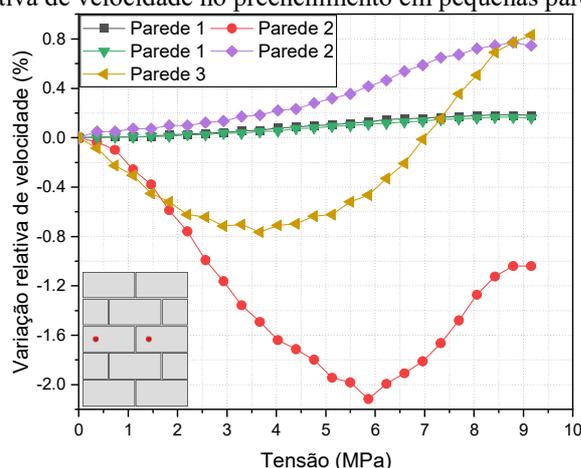
Fonte: da autora

Figura 4.46 – Variação relativa de velocidade no preenchimento em pequenas paredes: (a) blocos de quarta fiada e (b) blocos de segunda fiada



Fonte: da autora

Figura 4.47 – Variação relativa de velocidade no preenchimento em pequenas paredes: blocos de terceira fiada



Fonte: da autora

Os coeficientes acustoelásticos obtidos na paredes preenchidas são mostrados na Tabela 4.37. As velocidades e as curvas acustoelásticas obtidas na terceira fiada da Parede 1 se mostraram comparáveis às obtidas nos septos das paredes. Nestas curvas, os coeficientes acustoelásticos foram 0,021 ($R^2 = 0,98$) e 0,023 ($R^2 = 0,98$) e a VPU foi superior a 4000 m/s. No entanto, nas outras paredes, o comportamento das curvas acustoelásticas nas regiões preenchidas mostrou um decréscimo de velocidade após a aplicação de tensão e um formato semelhante ao de parábolas côncavas, repetindo padrões já observados nos ensaios de prismas de 3 blocos preenchidos, novamente com a observação de coeficientes acustoelásticos negativos. Com isso, conclui-se que a região preenchida é menos favorável à avaliação de tensões por meio do ensaio de VPU.

Tabela 4.37 – Coeficientes acustoelásticos – pequenas paredes preenchidas (região do preenchimento)

Bloco	Prisma 1		Prisma 2		Prisma 3	
	A	R ²	A	R ²	R ²	A
4 ^a fiada			-0,013	0,14	-0,10	0,71
3 ^a fiada	0,021	0,98	-0,15	0,42	0,11	0,38
3 ^a fiada	0,23	0,98	0,091	0,95		
2 ^a fiada			-0,30	0,16	-0,13	0,82

Fonte: da autora

4.17 Resumo do capítulo

Inicialmente, foram apresentados os resultados dos ensaios experimentais de caracterização dos materiais utilizados na pesquisa. Foram mostrados os resultados da análise dimensional e absorção do bloco, assim como os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados em blocos, prismas e pequenas paredes, sem e com preenchimento, cilindros de graute e cilindros de argamassa.

Além da caracterização, apresentou-se os resultados experimentais de ensaios de VPU realizados em elementos de alvenaria estrutural (blocos, prismas e pequenas paredes com e sem preenchimento) submetidos a compressão uniaxial. Todos as variações relativas de velocidade foram obtidos por meio da função correlação cruzada e foi possível observar o efeito acustoelástico em todos os tipos de elemento avaliados.

Inicialmente, planejou-se aplicar um carregamento equivalente a 70% da resistência característica aos elementos de alvenaria estrutural ensaiados. Entretanto, nos primeiros ensaios em blocos, observou-se que este nível de tensão aplicado em 10 ciclos de carregamento gerou fissuração no material. Portanto, o nível de tensão aplicado foi reduzido nos ensaios posteriores.

Os ensaios em blocos foram repetidos com a aplicação de carregamentos menores. Desta vez, as curvas acustoelásticas apresentaram um comportamento mais regular, especialmente nos septos externos, que receberam uma tensão menor que os internos. Estes resultados evidenciam a importância da manutenção de um carregamento baixo para a avaliação do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria de concreto. Dada a fragilidade do material e a pequena variação de velocidade gerada pelo efeito acustoelástico, a fissuração do bloco gera muita variação entre os resultados.

A partir dos ensaios em prismas com dois e três blocos, observou-se que estes elementos apresentaram curvas acustoelásticas mais regulares que os blocos. Este resultado leva à conclusão de que a introdução da camada de argamassa promoveu uma melhor distribuição de

tensões e de que os prismas se mostraram elementos mais propícios à avaliação da acustoelasticidade que os blocos isolados.

Um outro resultado relevante foi a similaridade dos coeficientes acustoelásticos em prismas de dois e três blocos. Por outro lado, os testes em pequenas paredes geraram coeficientes acustoelásticos cerca de 10 vezes menores que os obtidos em prismas.

Nos elementos preenchidos, a presença do graute aumentou a variação dos resultados, dado que a distribuição de tensão entre graute e bloco não foi exatamente igual em todas as amostras. Logo, amostras que tiveram maior variação nos septos apresentaram menor variação no preenchimento e vice-versa.

Em todas os elementos preenchidos, na avaliação da região preenchida, foi necessário verificar se as ondas se propagavam pelo graute ou se desviavam na interface e propagavam apenas pelo bloco. Estimou-se então uma velocidade mínima para que se considerasse que a trajetória de propagação ocorreu pelo graute e, quando a velocidade na região do preenchimento sem tensão aplicada foi inferior a este limite, os resultados do ensaio de VPU foram desconsiderados.

Com relação aos prismas preenchidos, houve uma grande diferença nos resultados dos prismas com 2 e 3 blocos, com grande variação de resultados na estrutura maior. Acredita-se que a maior retração nos prismas de 3 blocos tenha tido influência sobre a distribuição das tensões de compressão.

Por fim, concluiu-se que, mesmo nos elementos preenchidos, é preferível que a avaliação do efeito acustoelástico ocorra na região dos septos dos blocos, e não na região dos vazios.

5. Metodologia das simulações numéricas

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento das simulações numéricas realizadas ao longo desta pesquisa. Estas simulações se dividem em duas etapas.

A primeira etapa corresponde à simulação estática tridimensional de blocos, prismas e pequenas paredes por meio do Método dos Elementos Finitos com o auxílio da ferramenta computacional ABAQUS[®]. Esta simulação teve como objetivo avaliar a distribuição da tensão para auxiliar no planejamento do programa experimental e fornecer fundamentos teóricos para a discussão dos resultados. Os modelos foram elaborados e validados a partir da caracterização dos materiais utilizados no programa experimental.

A segunda etapa corresponde à simulação bidimensional da propagação de ondas mecânicas por uma seção de material heterogêneo a fim de representar os ensaios de Velocidade de Pulso Ultrassônico realizados em blocos durante o programa experimental. Nesta etapa, utilizou-se a ferramenta computacional TUSom, versão 9.4, criado pelo professor Vladimir G. Haach. Este software foi desenvolvido especificamente para auxiliar em análises de resultados de ensaios de Tomografia Ultrassônica (TU). Portanto, é uma ferramenta que se baseia na definição de velocidade para simular a trajetória de propagação de onda. Os objetivos desta etapa consistiram em representar o efeito acustoelástico na seção, verificar como a aplicação de tensão no modelo afeta a velocidade de propagação da onda e analisar o efeito da distribuição da porosidade na seção sobre a variação de velocidade.

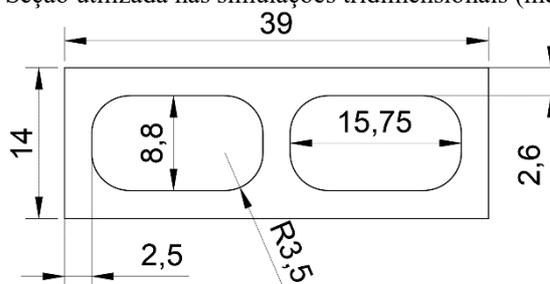
5.1 Aspectos gerais da primeira etapa de simulações

Nesta etapa, foram simulados um bloco isolado, um prisma formado por dois blocos, um prisma formado por três blocos e uma pequena parede submetidos a compressão uniaxial por meio do Método dos Elementos Finitos, com o auxílio da ferramenta computacional ABAQUS[®] (versão 2016).

O bloco simulado tem seção bruta de 39 cm x 14 cm, com altura de 19 cm. Como é próprio do processo de fabricação de blocos de alvenaria de concreto, as seções dos blocos analisados experimentalmente é troncocônica. No entanto, conforme mostrado por Carvalho (2019), a modelagem da seção troncocônica e utilização das dimensões reais em substituição às dimensões nominais dos blocos não influencia significativamente o comportamento estrutural do bloco. Portanto, adotou-se uma seção constante ao longo da altura dos blocos, com as dimensões mostradas na Figura 5.1. As medidas foram escolhidas de modo a respeitar as dimensões nominais do bloco, a espessura das paredes medida na análise dimensional e a área

líquida medida experimentalmente, correspondente a 290,23 cm². A seção modelada tem área líquida de 289,93 cm², resultando em uma diferença de 0,14% em relação à medida experimental.

Figura 5.1 – Seção utilizada nas simulações tridimensionais (medidas em cm)



Fonte: da autora

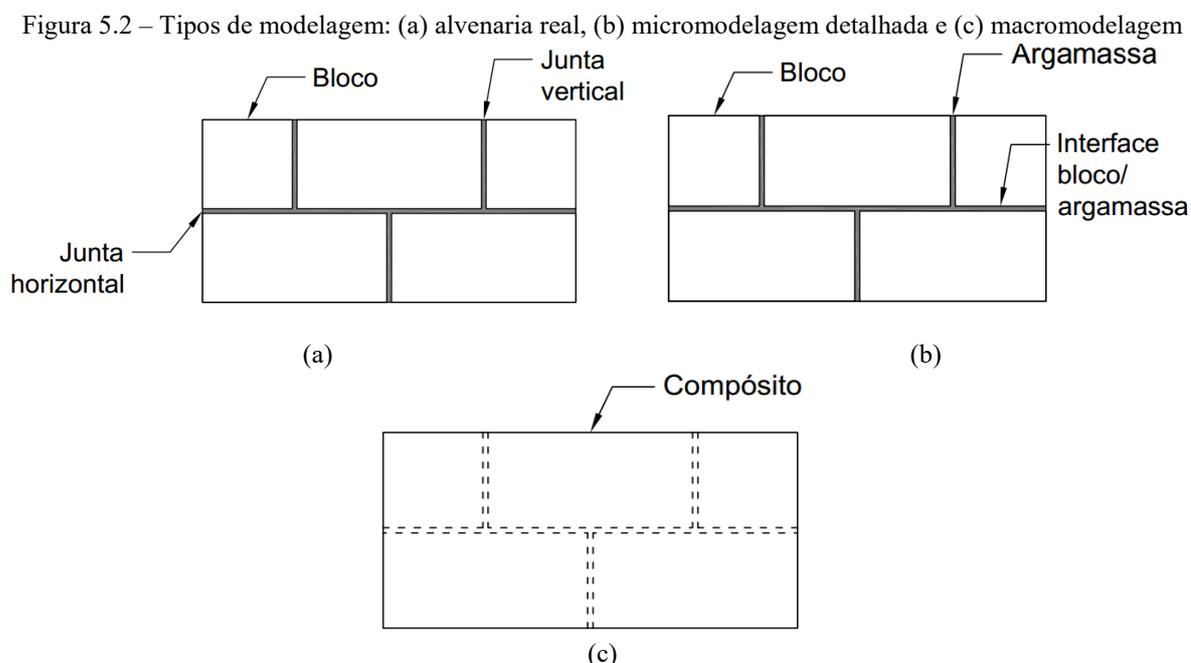
A aplicação do carregamento foi realizada por meio de aplicação de deslocamentos na sua face superior. Nas faces superior e inferior das estruturas de alvenaria, foram simuladas placas de aço com espessura de 5 cm e dimensões de 40 cm x 15 cm. As condições de contorno foram aplicadas nas placas, com todos os graus de liberdade restritos na face inferior do modelo e a face superior livre para se deslocar apenas na direção da aplicação do carregamento.

A interface de contato entre o bloco e a placa metálica foi caracterizada quanto ao seu comportamento normal e tangencial. Na direção normal, utilizou-se o comportamento de interface *“hard” contact*, que não permite a penetração entre as superfícies de contato, mas permite a separação entre elas. Na direção tangencial, utilizou-se a opção *penalty*, que permite a definição de um coeficiente de atrito relacionando a pressão de contato normal e a tangencial, adotado como 0,5 nesta interface. Além disso, é possível definir uma tensão de cisalhamento limite, a partir da qual as duas interfaces podem deslizar livremente. Na interface entre placa e bloco, não foi definida uma tensão limite. Por fim, é possível definir um deslocamento diferencial máximo entre as duas superfícies, mesmo com uma tensão de cisalhamento inferior ao limite. Para este parâmetro, adotou-se 0,005 da dimensão característica da superfície. A dimensão característica é calculada a partir das medidas laterais de todos os lados da superfície de contato do bloco.

O módulo de elasticidade dos blocos encontrado experimentalmente foi de 15,17 GPa considerando a área bruta. Considerando a área líquida, o módulo de elasticidade corresponde a 27,50 GPa. Os blocos analisados no programa experimental têm resistência média de 17,45 MPa e f_{bk} de 14,13 MPa, ambas as medidas na área bruta. Para o aço, adotou-se módulo de elasticidade de 200 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3.

5.2 Tipo de modelagem adotado

Conforme mostrado por Lourenço (1996), existem dois tipos de modelagem que podem ser utilizados para representação da alvenaria: a micromodelagem e a macromodelagem (Figura 5.2).



Fonte: adaptada de Lourenço (1996)

Quando se utiliza a micromodelagem, o modelo representa separadamente o bloco, a argamassa e a interface entre os dois. Já a macromodelagem implica na representação de blocos e argamassa como um único material de comportamento anisotrópico e que possui as características dos materiais em conjunto. Neste sentido, a escolha do tipo de modelagem se relaciona ao tamanho do modelo e aos objetivos da simulação.

A micromodelagem se aproxima mais da estrutura real, mas também demanda um maior esforço computacional e pode inviabilizar o processamento do modelo se for adotada em uma grande estrutura. Por outro lado, o uso da macromodelagem exige que sejam realizados ensaios com elementos estruturais a fim de obter os parâmetros que regem o comportamento da estrutura como um meio contínuo. Este tipo de modelagem pode ser utilizado quando a interação entre a junta e o bloco não for determinante para o fenômeno analisado.

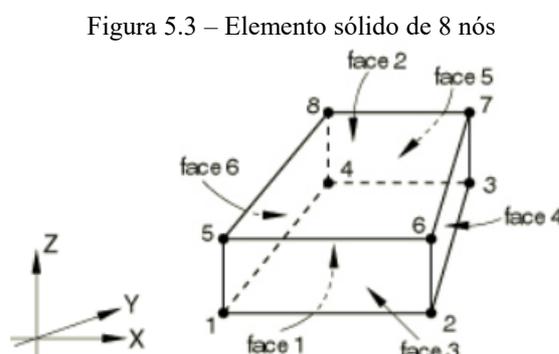
Uma vez que o objetivo principal destas simulações é a determinação dos campos de tensão em elementos de alvenaria e a presença da camada de argamassa influencia esta distribuição, a micromodelagem se mostra mais adequada para os modelos desenvolvidos neste trabalho.

5.3 Elemento finito adotado

Ao utilizar o MEF, o usuário da ferramenta computacional deve definir qual tipo de elemento finito será adotado em sua análise. Cada tipo de elemento tem sua própria formulação, que leva em consideração simplificações e particularidades. Os elementos podem ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais; a quantidade de nós e o formato do elemento podem variar, assim como a formulação dos campos de tensão e deformação entre os nós.

Qualquer problema mecânico pode ser representado por meio de elementos tridimensionais. Entretanto, dependendo das condições do problema e das informações relevantes ao pesquisador, o mesmo pode ser simplificado a fim de reduzir o custo computacional de seu processamento. O problema estudado (elementos de alvenaria sujeitos a um ensaio de compressão) tem carregamento distribuído uniformemente ao longo da face superior do elemento e, portanto, uniaxial. O objetivo desta modelagem é a obtenção da distribuição do campo de tensões no elemento. Neste sentido, a utilização de elementos bidimensionais apresentaria uma solução possível para os modelos de blocos e prismas. Entretanto, a representação da pequena parede em elementos bidimensionais, com representação dos septos dos blocos, seria inviável.

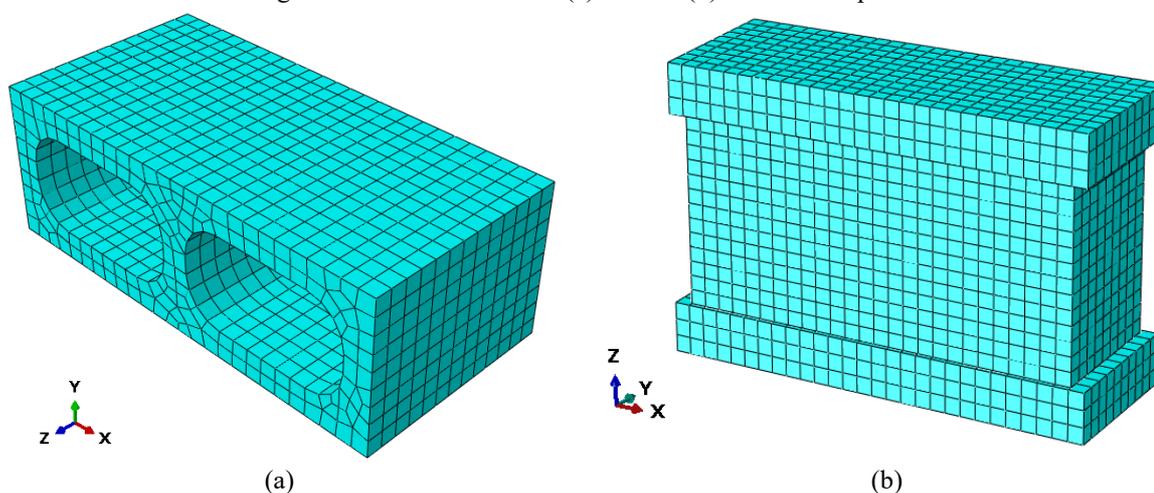
Portanto, a fim de simular-se a compressão dos elementos de alvenaria estrutural por meio de um modelo tridimensional, adotou-se o elemento sólido hexaédrico C3D8R (Figura 5.3). A malha adotada nesse modelo não exige nenhum refinamento local, com os elementos tendo aproximadamente as mesmas dimensões ao longo de todo o modelo. Nesse caso, a regularidade da malha favorece a adoção de um tipo de elemento hexaédrico, que apresentam resultados mais precisos que elementos octaédricos nesta situação (Abaqus Analysis, 2015). O elemento C3D8R apresenta 8 nós por elemento e interpolação linear em todas as direções.



Fonte: Abaqus Analysis (2015)

A malha adotada para a simulação da unidade de alvenaria e das placas de aço é mostrada na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Malha adotada: (a) bloco e (b) modelo completo



Fonte: da autora

5.4 Modelo de material adotado

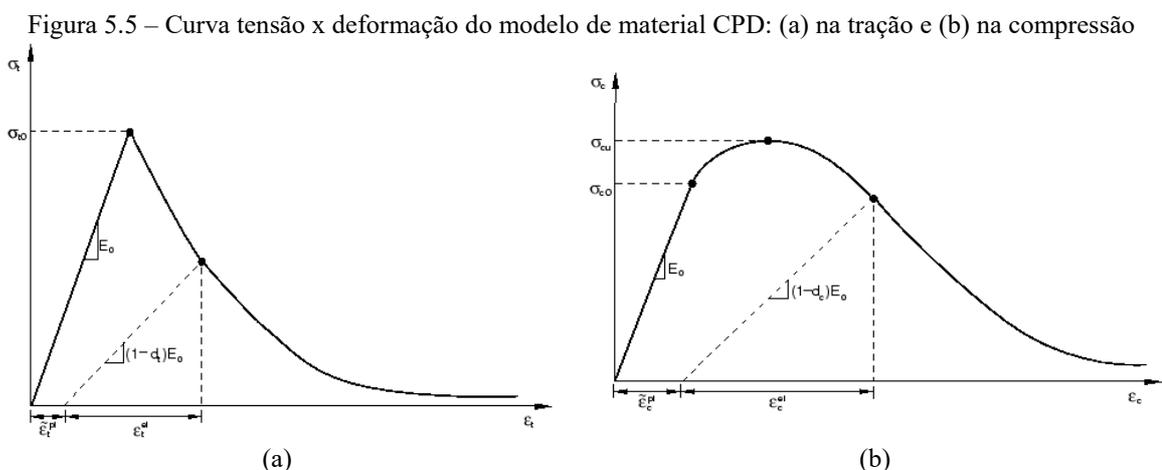
O modelo de comportamento escolhido para a simulação do bloco de concreto foi o Concrete Damaged Plasticity (CDP). Segundo o manual Abaqus Analysis (2015), este modelo é adequado para a representação de materiais frágeis e foi desenvolvido especificamente para o concreto, podendo o material estar sujeito a carregamentos monotônicos, cíclicos ou dinâmicos. Apesar de ser um modelo criado para a análise de estruturas de concreto armado, o mesmo pode ser usado para a representação de concreto simples, como o presente no bloco de alvenaria. Este modelo se baseia em conceitos de plasticidade e da mecânica do dano, representando a fissuração do material de forma distribuída (*smearred cracking*).

O manual Abaqus Analysis (2015) afirma que os mecanismos de falha que podem ser representados pelo modelo são o esmagamento na compressão e a fissuração na tração. O manual descreve as seguintes propriedades do modelo:

- Tensões de ruptura diferentes na compressão e na tração, sendo a primeira muito maior que a segunda (dez vezes ou mais);
- A degradação do módulo de elasticidade ocorre de modos diferentes na tração e na compressão;
- Ocorre recuperação de rigidez durante o carregamento cíclico;
- O modelo é sensível à velocidade de aplicação do carregamento.

A representação do comportamento da curva tensão-deformação do modelo CPD de material na tração e na compressão uniaxiais é mostrada na Figura 5.5. Na tração, assume-se

que o material tem comportamento linear até atingir a tensão de ruptura à tração. Uma vez atingida a resistência à tração, ocorre a formação de fissuras e o “softening” do material, com diminuição brusca do seu módulo de elasticidade. Na compressão, quando submetido a baixos níveis de tensão, o comportamento é assumido linear. Quando o material começa a plastificar, ocorre um aumento da rigidez (“hardening”) até que se atinja a tensão máxima suportada pelo material. Se a deformação no material continua aumentando após a aplicação da tensão máxima, o nível de tensão no material diminui e ocorre a redução no seu módulo de elasticidade.



Fonte: Abaqus Analysis (2015)

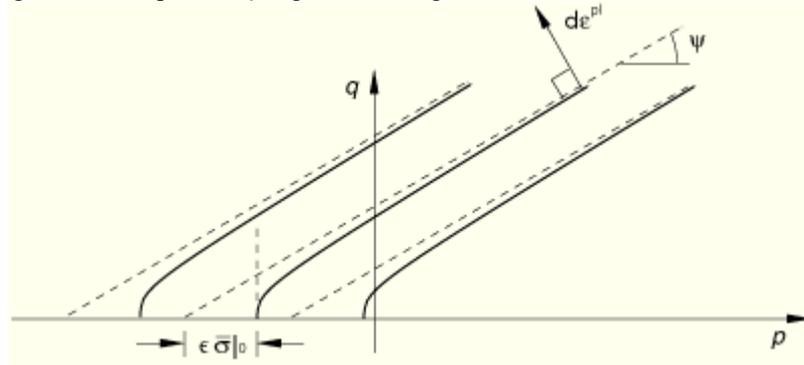
Os parâmetros necessários à caracterização do modelo são divididos em quatro categorias: comportamento elástico, plasticidade, comportamento na compressão e comportamento na tração. Nas abas referentes ao comportamento na compressão e na tração, é possível ainda caracterizar a danificação do material sob cada uma dessas solicitações. Neste trabalho, utilizou-se apenas parâmetros de dano na compressão.

Os critérios para caracterização do regime elástico são o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. O módulo de elasticidade adotado foi de 27,50 GPa considerando a área líquida do bloco. O coeficiente de Poisson adotado de 0,2 corresponde ao valor recomendado pela ABNT NBR 16868-1:2020.

Os critérios para caracterização da plasticidade do material são: ângulo de dilatância, excentricidade, relação entre a tensão de ruptura na compressão biaxial e uniaxial, coeficiente K_c e parâmetro de viscosidade. Estes valores calibram a superfície de ruptura do material. O critério de falha adotado é o de Drucker-Prager modificado. O ângulo de dilatância indica o ângulo entre a superfície e o eixo hidrostático, e a excentricidade indica o quanto a ponta do arredondada do cone se distancia da ponta teórica da superfície (Figura 5.6). Os valores

adotados para estes dois parâmetros foram indicados por Carvalho (2019) para a simulação de blocos de concreto. Adotou-se 40° para o ângulo de dilatância e 0,1 para excentricidade.

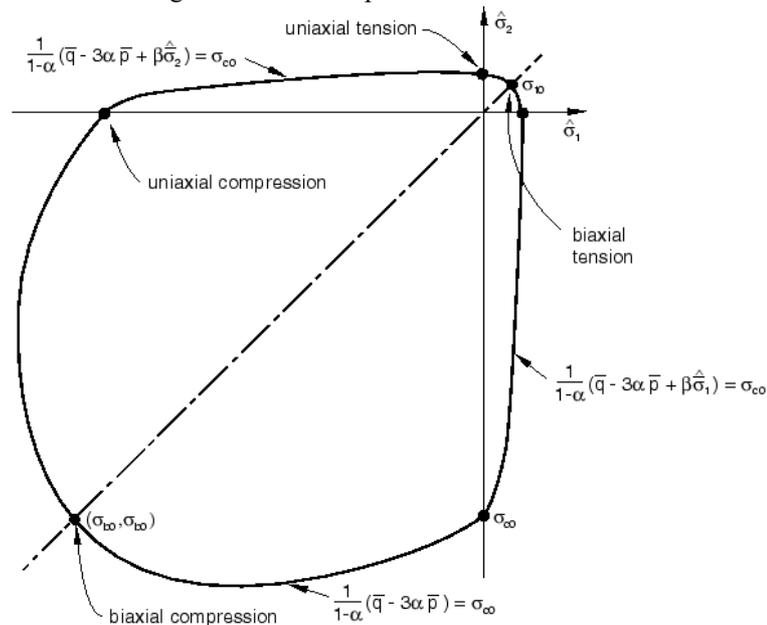
Figura 5.6 – Representação gráfica do ângulo de dilatância e da excentricidade



Fonte: Abaqus Analysis (2015)

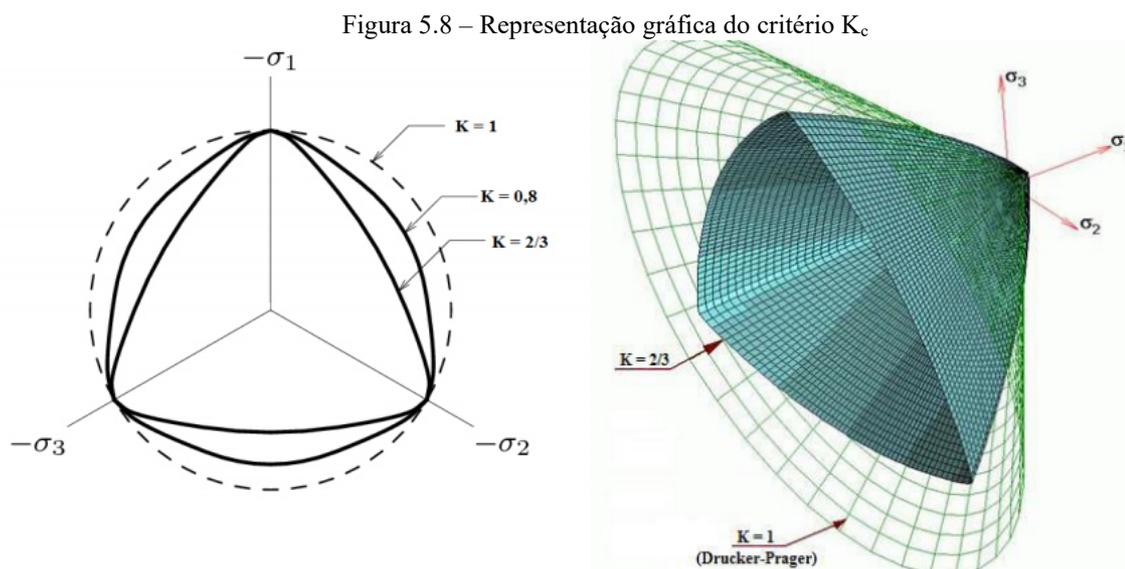
O parâmetro σ_{b0}/σ_{c0} representa o aumento na resistência à compressão quando o elemento é confinado. Este parâmetro pode ser representado graficamente pela Figura 5.7, que mostra a superfície de ruptura do material no estado plano de tensões. O manual Abaqus Analysis (2015) indica que valores apropriados à caracterização do concreto para esse parâmetro se encontram entre 1,10 e 1,16. Neste estudo, adotou-se o valor de 1,16, conforme indicado por Santos et al. (2017). Os parâmetros α e β que regem a inclinação da curva são funções de σ_{b0}/σ_{c0} e de Kc.

Figura 5.7 – Estado plano de tensões no CPD



Fonte: Abaqus Analysis (2015)

O parâmetro K_c é utilizado para modificar a superfície de Drucker-Prager. Tradicionalmente, este critério apresenta formato circular no plano de Nadai, que seria correspondente ao valor de K_c igual a 1. Conforme o valor de K_c diminui, o corte da superfície no plano de Nadai se aproxima do triângulo, conforme mostrado na Figura 5.8. Para a representação do concreto, o manual Abaqus Analysis (2015) recomenda que se utilize K_c igual a $2/3$ ou 0.666, valor adotado nesta análise.



Fonte: Aguiar (2015)

Por fim, o último atributo necessário para a descrição da plastificação do material é o parâmetro de viscosidade ou regularização viscoplástica. Este é um parâmetro artificial que tem a função de aliviar as restrições do modelo para a obtenção do equilíbrio. O valor padrão desta propriedade para o modelo Concrete Damaged Plasticity corresponde a 0,0001. Durante as simulações realizadas, constatou-se que a adoção do valor 0,01 leva a um menor tempo de processamento sem modificar significativamente o comportamento da estrutura. Portanto, adotou-se o valor de 10^{-2} para este parâmetro.

Um resumo dos valores adotados para cada parâmetro é mostrado na Tabela 5.1.

A caracterização do comportamento à compressão do concreto é dada por uma tabela que relaciona a tensão aplicada à deformação inelástica. A deformação inelástica pode ser descrita como a deformação total menos a deformação elástica. A conversão da deformação inelástica (ε_c^{in}) para a deformação plástica (ε_c^{pl}) é feita por meio da Equação (5.1).

Tabela 5.1 – Parâmetros de material utilizados na simulação dos blocos de alvenaria

Parâmetro	Valor adotado
Ângulo de dilatância	40
Excentricidade	0,1
σ_{b0}/σ_{c0}	1,16
K	0,667
Viscosidade	0,01

Fonte: da autora

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (5.1)$$

Observando a Equação (5.1), podemos perceber que a deformação plástica é dada pela deformação inelástica diminuída de um valor relacionado à danificação do material. Nesta equação, d_c é um parâmetro que indica o dano na compressão, σ_c corresponde à tensão de compressão aplicada e E_0 representa o módulo de elasticidade inicial do material.

A curva tensão-deformação do concreto foi definida a partir da Equação (5.2) proposta por Carreira e Chu (1985). Esta equação representa bem o comportamento do concreto, uma vez que obedece aos seguintes critérios: mostra boa correlação com dados experimentais; é capaz de representar os trechos ascendente e descendente da curva; se baseia em parâmetros com significado físico (módulo de elasticidade inicial, resistência à compressão, deformação na ruptura); e no ponto de máxima tensão, a derivada da função deve ser igual a zero. Além disso, a formulação apresenta as vantagens de usar uma única equação para toda a curva e de ser de fácil aplicação, com uma expressão simples.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma'_c} = \frac{\beta \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon'_c} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon'_c} \right)^\beta} \quad (5.2)$$

Na Equação (5.2), σ'_c corresponde ao valor da resistência à compressão do concreto; ε corresponde à deformação total da amostra no nível de carregamento σ_c ; ε'_c corresponde à deformação na ruptura; e β corresponde a um parâmetro definido pela Equação (5.3).

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c E_0}} \quad (5.3)$$

Para geração da curva tensão-deformação, a fim de representar os blocos utilizados durante o programa experimental, adotou-se resistência à compressão de 32,6 MPa, módulo de elasticidade de 27,5 GPa e deformação na ruptura de 2,6 %.

Para definir o parâmetro de dano na compressão, utilizou-se o modelo descrito por Birtel e Mark (2006) mostrado na Equação (5.4). Esta equação foi desenvolvida a fim de ser utilizada para a caracterização do material definido pelo modelo Concrete Damaged Plasticity.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c / E_0}{\varepsilon_c^{pl} \left(\frac{1}{b_c} - 1 \right) + \sigma_c / E_0} \quad (5.4)$$

Nesta equação, b_c é um fator constante que pode variar entre zero e um. Os autores recomendam que se utilize o valor de 0,7. O valor da deformação elástica adotado deve ser igual à deformação inelástica multiplicada pelo fator b_c .

Além dos parâmetros utilizados para caracterização do comportamento do concreto à compressão, é possível introduzir ainda dados referentes à variação da deformação com a velocidade de aplicação do carregamento e dados referentes a variação de temperatura.

Para a caracterização do comportamento do material à tração, é preciso relacionar a tensão de ruptura na tração a uma deformação, deslocamento ou energia de fratura.

A tensão de ruptura adotada foi calculada a partir do $f_{ctk,inf}$ do concreto, conforme indicado pela ABNT NBR 6118:2014 e mostrado nas Equações (5.5) e (5.6). Portanto, a tensão de ruptura do concreto na tração corresponde a 2,1 MPa.

$$f_{ct,m} = 0.3(f_{ck})^{2/3} \quad (5.5)$$

$$f_{ctk,inf} = 0.7f_{ct,m} \quad (5.6)$$

Segundo FIB (2013), a energia de fratura corresponde à energia necessária para propagar uma fissura de tração em uma unidade de área e é um indicativo à resistência à tração do concreto.

A determinação da energia de fratura (G_F) em elementos de concreto, assim como a determinação da resistência a tração, pode ser realizada experimentalmente por meio do ensaio de tração direta. Entretanto, a realização deste tipo de ensaio em concreto envolve dificuldades e nem sempre a ruptura do material ocorre de maneira que permita a avaliação desta grandeza. Portanto, é mais comum que se utilizem correlações entre a energia de fratura e a resistência à compressão média do material (f_{cm}). O boletim FIB (2013) traz diversas equações de correlação que podem ser utilizadas e que terão maior precisão de acordo com as especificidades do material (tamanho e origem do agregado, por exemplo). Neste trabalho, optou-se por utilizar a Equação (5.7), presente nas recomendações deste boletim.

$$G_F = G_{Fo} \left(\frac{f_{cm}}{10MPa} \right)^{0.7} \quad (5.7)$$

Na formulação para determinar a energia de fratura, é definida uma constante de energia de fratura (G_{Fo}) que depende do tamanho do agregado utilizado no concreto e que pode ser determinada a partir da Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valor da constante de energia de fratura em função da dimensão máxima característica dos agregados

d_{max} (mm)	G_{Fo} (N/mm)
8	0,025
16	0,03
32	0,058

Fonte: FIB (2013)

Neste trabalho, utilizou-se o valor 0,025 para a constante de energia de fratura, uma vez que a dimensão máxima característica dos agregados (d_{max}) usados para fazer blocos de concreto é inferior a 8 mm. Portanto, a partir da Equação (5.7), adotou-se o valor de 0,055 N/mm ou 55 N/m para a energia de fratura do material.

O comportamento da argamassa também foi simulado a partir do modelo *Concrete Damaged Plasticity*, com os parâmetros mostrados na Tabela 5.3. A curva tensão-deformação foi determinada com base na equação de Carreira e Chu (1985). A resistência à compressão média medida experimentalmente corresponde a 17 MPa, com módulo de elasticidade de 20 GPa e deformação na ruptura de 2,25 %. No entanto, observou-se que o modelo do prisma

apresentava rigidez muito elevada em relação ao resultado experimental com esses valores de resistência e módulo de elasticidade.

Tabela 5.3 – Parâmetros de material utilizados na simulação tridimensional da argamassa

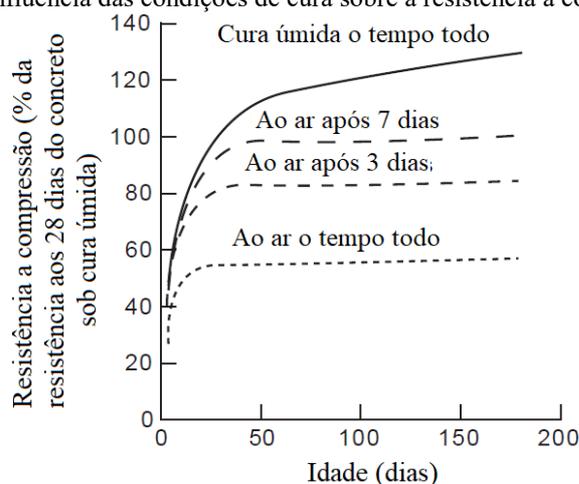
Parâmetro	Valor adotado
Ângulo de dilatância	50
Excentricidade	0,1
σ_{b0}/σ_{c0}	1,16
K	0,667
Viscosidade	0,01

Fonte: da autora

Nesse sentido, existem aspectos do processo de fabricação da estrutura real que podem fazer com que as propriedades da argamassa no prisma sejam diferentes das propriedades medidas no material isolado. Os cilindros utilizados nos ensaios de determinação da resistência à compressão foram moldados assim que a argamassa foi retirada do misturador, enquanto o assentamento de prismas e paredes foi realizado ao longo do prazo máximo de 2 horas e 30 minutos, conforme indicado pela ABNT NBR 16868-2:2020. O adensamento dos cilindros foi realizado por meio de uma mesa vibratória, enquanto a argamassa nos prismas foi simplesmente assentada. Além disso, a relação água/cimento foi alterada nos prismas, uma vez que a consistência da argamassa foi ajustada com a adição de uma pequena quantidade de água por, no máximo, duas vezes durante o assentamento, conforme indicado pela ABNT NBR 15961-2:2011. Por fim, a cura dos cilindros foi realizada em câmara úmida, enquanto os prismas foram mantidos em ambiente de laboratório, embora umedecidos diariamente e cobertos com lona plástica a fim de evitar perda de água.

Kocab et al. (2017) avaliou a variação do módulo de elasticidade de dois traços de concreto quando submetidos a cura úmida e sem esse processo. No primeiro traço, a variação máxima no módulo de elasticidade estático foi de 30,5%; no segundo traço, a variação máxima foi de 19,8%. Mehta e Monteiro (2008) mostram a redução da resistência do concreto sem cura, em comparação com a resistência do concreto submetido a cura úmida aos 28 dias (Figura 5.9), indicando que a resistência de um material cimentício seco ao ar pode ser 40% menor que o material submetido a cura úmida.

Figura 5.9 – Influência das condições de cura sobre a resistência à compressão do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

A partir das diferenças listadas no processo de cura da argamassa e do comportamento observados para materiais cimentícios na literatura, os valores de resistência e módulo de elasticidade medidos experimentalmente foram reduzidos em 20% nos modelos de prismas e pequenas paredes. Portanto, adotou-se resistência à compressão de 13,6 MPa e módulo de elasticidade de 16 GPa nestas simulações.

Uma vez que o programa experimental não contemplou o comportamento da argamassa à tração, os parâmetros utilizados na simulação foram estimados com base na literatura. Rao (2001) investigou a aplicação da Lei de Abrams para estimar a resistência de traços de argamassa a partir de sua relação água/cimento. Para tanto, o autor avaliou 24 traços de argamassa de cimento, com variação da quantidade de agregado e de água na mistura por meio de ensaios de compressão e tração por compressão diametral. Para argamassas de traço 1:3 (cimento:areia), o autor encontrou a relação mostrada na Equação (5.8) entre a relação água/cimento (w/c) e a resistência a tração determinada pelo ensaio de tração indireta ($f_{ct,sp}$). Considerando ainda a recomendação da NBR 6118:2014, adotou-se a resistência a tração direta f_{ct} como 90% da resistência a tração indireta. Adotou-se então o valor de 1,34 MPa para a resistência a tração da argamassa. Realizando o mesmo procedimento adotado para o concreto, determinou-se o valor de 0,31 N/mm ou 31 N/m para a energia de fratura do material.

$$f_{ct,sp} = 1.348(W/C)^{-0.6137} \quad (5.8)$$

A interface entre o bloco e argamassa foi caracterizada de forma similar ao contato entre placa e bloco. Na direção normal, foi adotado o modelo “*hard*” *contact* novamente, a fim de impedir a interpenetração de material.

Como o programa experimental não contemplou a caracterização do comportamento da interface entre bloco e argamassa, os parâmetros necessários foram definidos a partir do trabalho de Santos et al. (2017), que simulou elementos de alvenaria semelhantes. Portanto, na direção tangencial, foi admitida a formulação de atrito *penalty*, com coeficiente de atrito de 0,5 e deslocamento diferencial máximo entre as duas superfícies correspondente a 0,005 da dimensão característica da superfície de contato. Nesta interface, foi definida uma tensão de cisalhamento máxima de 1,05 kN/cm².

Todos as juntas de argamassa foram simuladas com espessura de 1 cm.

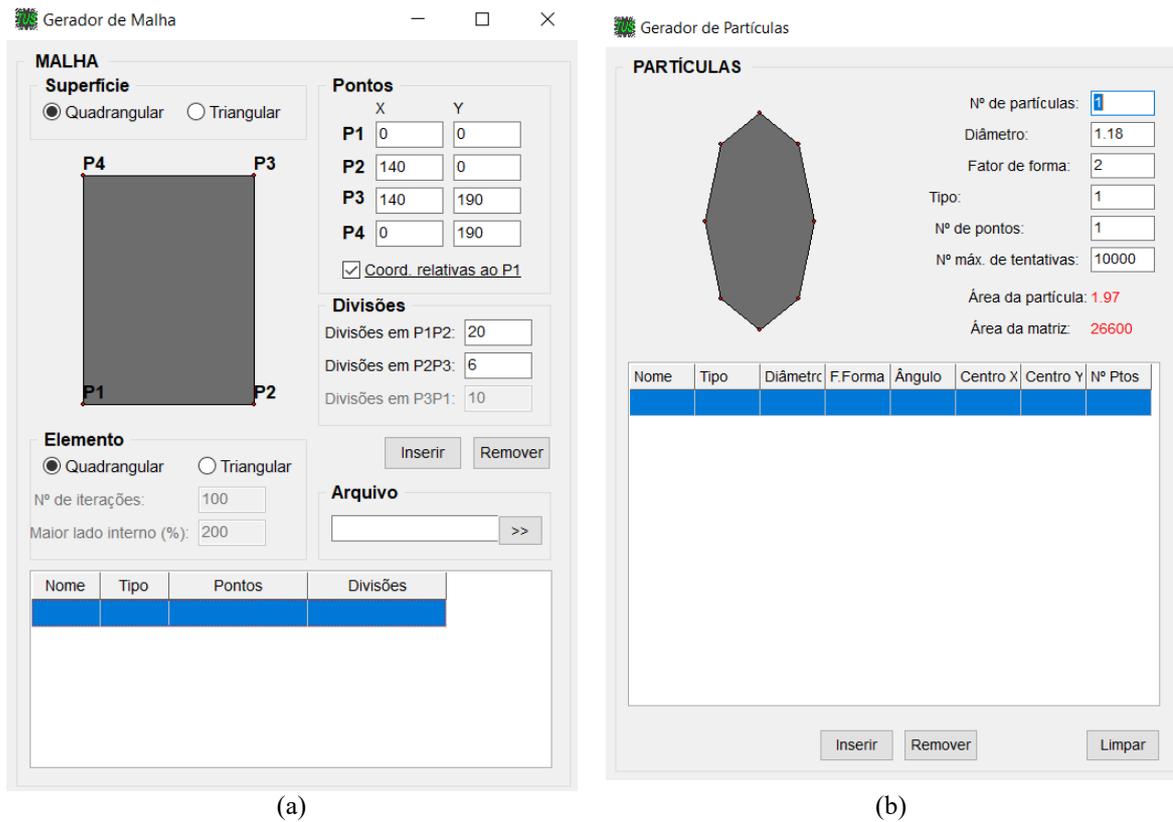
5.5 Aspectos gerais da segunda etapa de simulações

A segunda etapa de simulações foi realizada com auxílio do software TUSom, uma ferramenta computacional de uso exclusivamente acadêmico desenvolvida pelo Prof. Dr. Vladimir Haach, com a colaboração de alunos do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – SET/EESC (RAMÍREZ, 2015; GIGLIO, 2021; SOUZA, 2021). O programa tem como principal finalidade a geração de tomogramas, que correspondem a mapas de distribuição das velocidades de propagação de pulso ultrassônico em uma seção, a fim de auxiliar na análise de resultados experimentais de ensaios de tomografia ultrassônica.

A partir das coordenadas da seção, é possível definir um modelo dividido em elementos quadrangulares ou triangulares (Figura 5.10a). A seção criada pode ser composta por material homogêneo ou conter partículas ou fibras de outro material. Neste caso, é necessário determinar a quantidade, o diâmetro e o fator de forma (relação entre as dimensões perpendiculares da partícula) das partículas (Figura 5.10b). Podem ser incluídas partículas de diâmetros, fatores de forma e propriedades mecânicas diferentes, daí a necessidade de identificar o tipo da partícula. A distribuição das partículas ao longo da superfície é gerada aleatoriamente. Uma vez gerada a malha, é possível indicar o posicionamento dos transdutores por meio das suas coordenadas. Além disso, é necessário indicar quais foram as linhas de medição realizadas, ou seja, entre quais transdutores a onda foi propagada (Figura 5.11a).

Em um ensaio de ultrassom, os transdutores piezoelétricos emitem a onda mecânica por toda a sua superfície. Portanto, é possível que a trajetória de propagação mais rápida não tenha como ponto de partida o centro do transdutor. A fim de introduzir esta possibilidade na simulação, é possível indicar o tamanho do transdutor e quantos pontos ao longo de seu comprimento devem ser considerados como prováveis pontos de emissão ou chegada da onda (Figura 5.11b).

Figura 5.10 – Interface do TUSom: (a) gerador de malha e (b) gerador de partículas

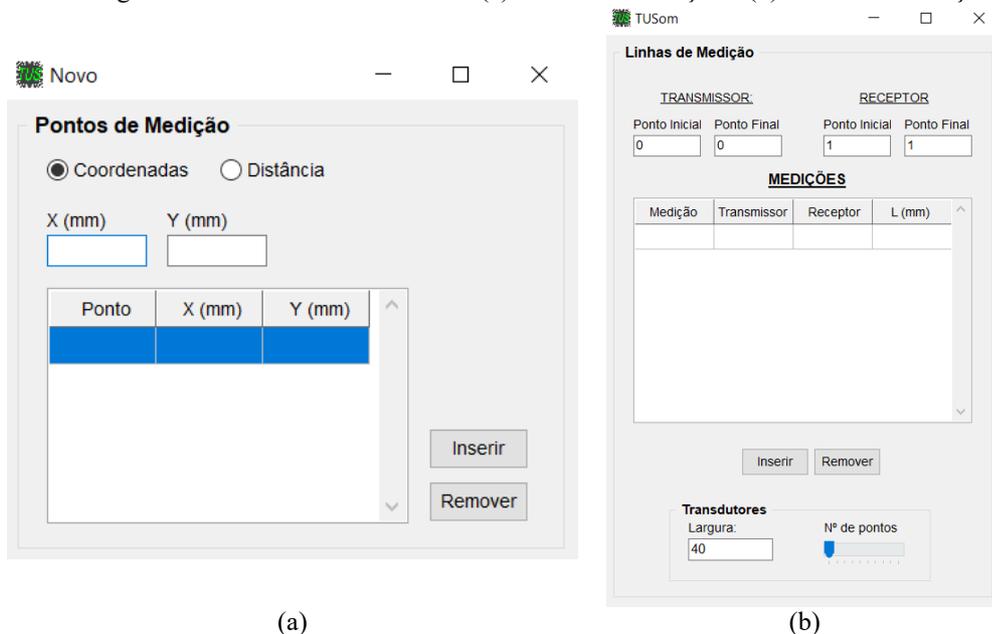


(a)

(b)

Fonte: da autora

Figura 5.11 – Interface do TUSom: (a) Pontos de Medição e (b) Linhas de Medição



(a)

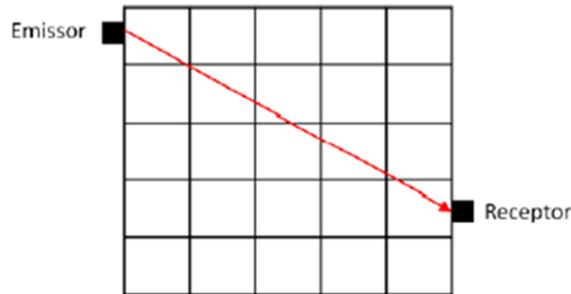
(b)

Fonte: da autora

O ensaio de tomografia ultrassônica consiste na aplicação de múltiplos ensaios de VPU em diferentes pontos da seção de uma estrutura e posterior representação desta seção por meio de algoritmos de reconstrução de imagem (GIGLIO, 2021). Ramírez (2015) explica o conceito

matemático da análise de resultados de TU. Considerando uma onda que percorre a uma seção discretizada segundo a trajetória mostrada na Figura 5.12, a trajetória L é dada pela soma das distâncias percorridas em cada elemento (ΔL_i), assim como o tempo de chegada T corresponde à soma dos tempos necessários para percorrer cada elemento. Logo, podemos definir T de acordo com a Equação (5.9). Considerando que um ensaio de tomografia é composto por j medidas ao longo da seção, temos a Equação (5.10).

Figura 5.12 – Ensaio de VPU em uma seção discretizada



Fonte: Ramírez (2015)

$$T = \sum_i \frac{\Delta L_i}{V_i} \quad (5.9)$$

$$T^j = \sum_i \frac{\Delta L_i^j}{V_i} \quad (5.10)$$

Por fim, é possível transformar a Equação (5.10) em um sistema de equações lineares em que a incógnita é o vetor vagarosidade (c_i), que corresponde ao inverso do vetor de velocidade.

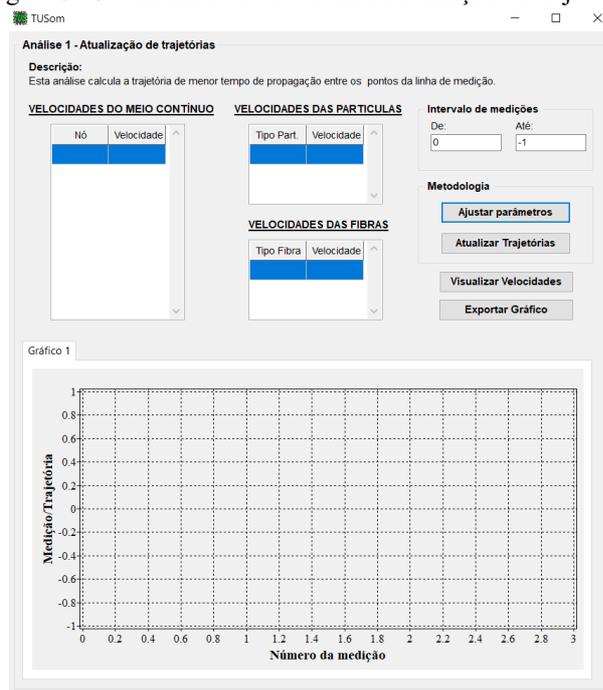
$$T^j = \sum_i \Delta L_i^j c_i \quad (5.11)$$

Neste sentido, a principal aplicação do TUSom consiste na solução do sistema linear descrito na Equação (5.11) a fim de determinar os valores de VPU na seção discretizada e gerar a visualização do mapa de velocidades no modelo.

Neste trabalho, foram utilizadas duas ferramentas da aplicação TUSom que realizam o processo inverso, ou seja, a partir da inserção das velocidades nos nós da malha, foi possível simular a trajetória e o tempo propagação da onda entre dois transdutores.

A Figura 5.13 mostra a interface da aplicação para atualização de trajetórias. Nesta janela, é possível informar a velocidade de propagação em cada um dos nós do modelo, assim como a velocidade que deve ser considerada em cada tipo de partícula. O objetivo desta análise é determinar a trajetória otimizada (que leva o menor tempo) para uma onda se deslocando entre dois transdutores, a partir da distribuição de velocidades na seção. Em um ensaio de velocidade de pulso ultrassônico, a trajetória é assumida como linear do transmissor ao receptor. Entretanto, em materiais heterogêneos, como o concreto, os vazios decorrentes da porosidade do material e da zona de transição provocam desvios na propagação da onda, fazendo com que sua trajetória deixe de ser retilínea. Neste sentido, esta ferramenta aplica algoritmos determinísticos ou bioinspirados para simular e determinar uma trajetória que minimize o tempo de propagação, considerando os desvios que a onda precisa fazer para contornar a presença das heterogeneidades do material e a variação de velocidade ao longo da seção.

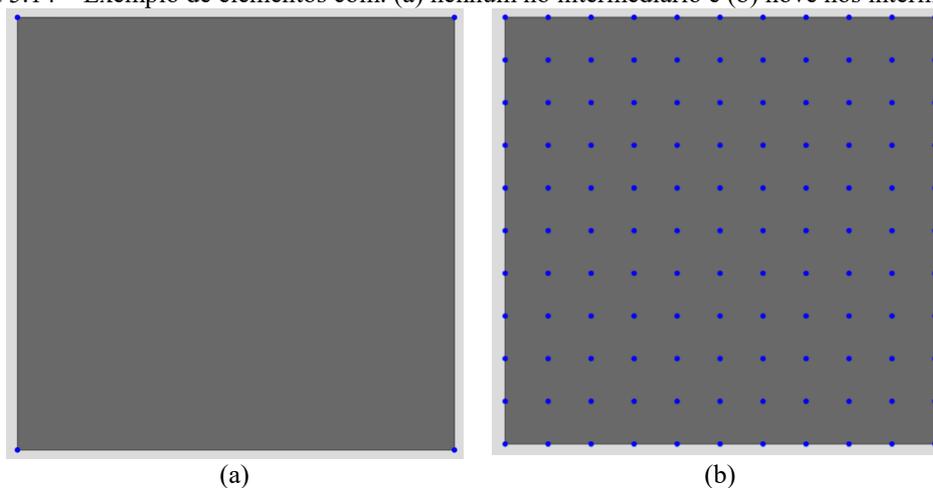
Figura 5.13 – Interface do TUSom: Atualização de trajetórias



Fonte: da autora

Para realizar a otimização da trajetória neste trabalho, utilizou-se o algoritmo determinístico de Dijkstra (1959), proposto pelo autor como uma solução para problemas de custo mínimo. O programa permite que o usuário adicione nós auxiliares (além dos nós originais já presentes na malha definida, conforme mostrado na Figura 5.14) de maneira a otimizar a trajetória, uma vez que ela é definida a partir do percurso percorrido pela onda entre nós.

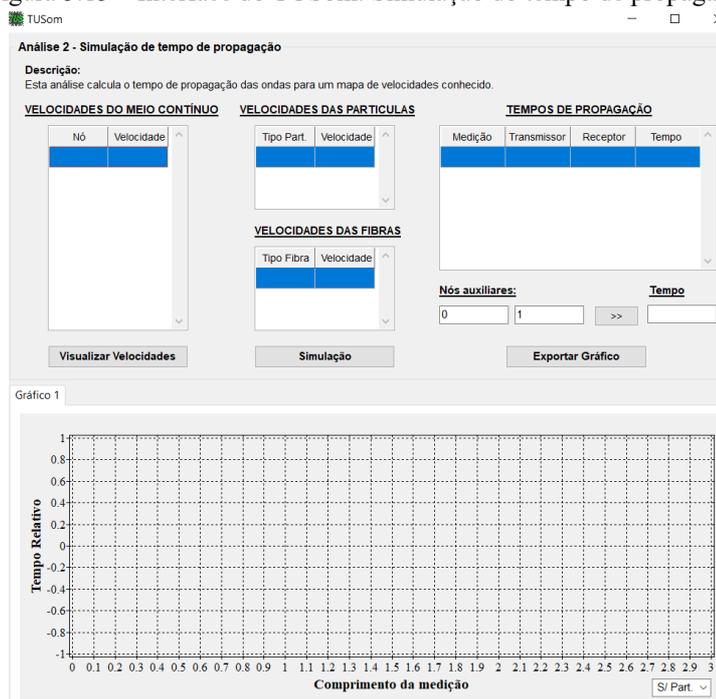
Figura 5.14 – Exemplo de elementos com: (a) nenhum nó intermediário e (b) nove nós intermediários



Fonte: da autora

Além da ferramenta de otimização de trajetórias, o aplicativo oferece também uma ferramenta de simulação de tempo de propagação (interface mostrada na Figura 5.15).

Figura 5.15 – Interface do TUSom: Simulação do tempo de propagação



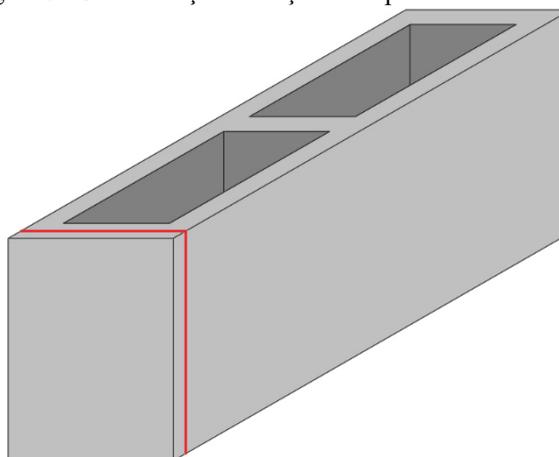
Fonte: da autora

Os dados de entrada para esta aplicação do programa correspondem às velocidades de propagação nos nós do modelo e nas partículas e fibras (se houverem). A trajetória considerada para a simulação do tempo de propagação será correspondente à trajetória linear entre os transdutores ou a trajetória otimizada a partir da ferramenta “Atualização de trajetórias”.

5.6 Descrição do modelo desenvolvido no TUSom

Nesta simulação bidimensional, representou-se uma seção do septo externo dos blocos submetidos a ensaios de VPU sob compressão uniaxial, indicada em vermelho na Figura 5.16. A distribuição de tensões ao longo da seção foi determinada a partir do modelo do bloco comprimido desenvolvido com o auxílio do software ABAQUS®, conforme descrito neste capítulo.

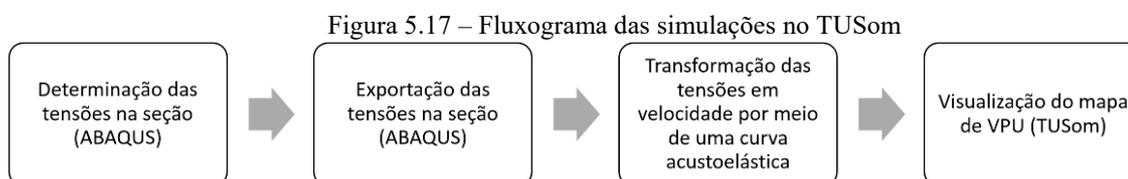
Figura 5.16 – Indicação da seção do septo externo simulada



Fonte: da autora

Uma vez determinada a distribuição de tensões no bloco a partir do modelo simulado, utilizou-se um coeficiente estimado a partir dos ensaios experimentais para transformar as tensões de compressão em distribuição de velocidade na seção. A visualização do mapa de VPU foi realizada por meio do TUSom.

A sequência mostrada na Figura 5.17 foi aplicada a todas as simulações de propagação de ondas realizadas.



Fonte: da autora

5.7 Descrição do modelo desenvolvido no TUSom para seções heterogêneas

A fim de representar melhor o material e discutir os efeitos dos vazios sobre a propagação de pulso ultrassônico, outras simulações foram realizadas. A partir do modelo

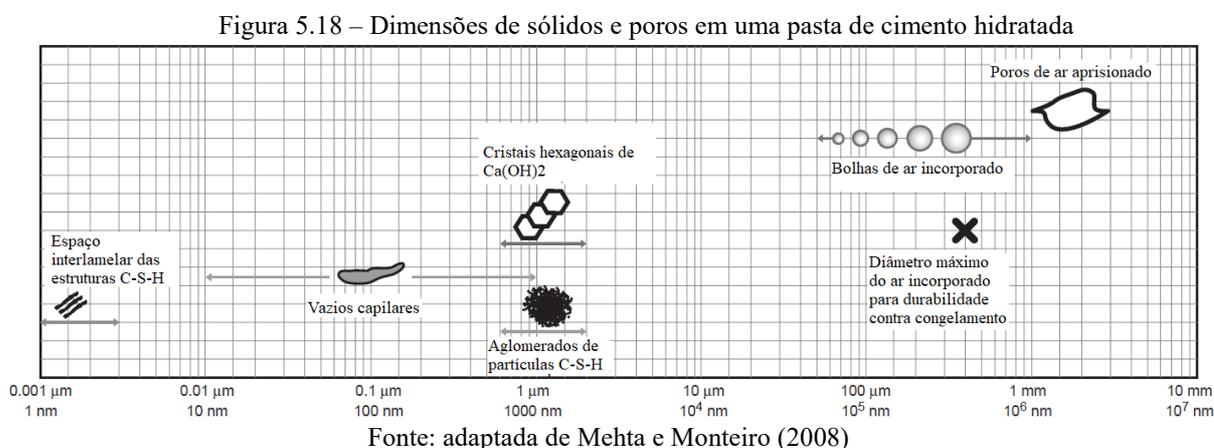
desenvolvido para seções homogêneas, foram adicionadas partículas de pequenas dimensões e com velocidade de propagação correspondente à velocidade no ar.

A área ocupada pelos vazios nesta simulação bidimensional foi estimada a partir dos dados experimentais obtidos para os blocos durante os ensaios de caracterização, realizados conforme a ABNT NBR 12118:2013. Conforme listado na Tabela 4.1 e na Tabela 4.7, a altura média e a área líquida média dos blocos correspondem a 189,3 mm e a 29023,1 mm², respectivamente. Portanto, multiplicando os dois valores, encontramos um volume líquido de 5494,9 cm³.

A partir do ensaio de absorção, cujos dados são mostrados na Tabela 4.7, podemos calcular a diferença entre as médias de massa saturada m_2 (13006,0 g) e a massa seca m_1 (12471,3 g), equivalente a 534,7 g. Uma vez que esta massa corresponde à água presente nos vazios do bloco e que a densidade da água corresponde a 1 g/cm³, considerou-se que o volume de vazios no bloco corresponde a 534,7 cm³, ou 9,73% do seu volume. Como as simulações no TUSom são bidimensionais, foi estimado que os vazios ocupam a mesma proporção encontrada para o volume do bloco na área da seção.

A simulação dos vazios na seção foi realizada por meio da ferramenta Gerador de Partículas, mostrada na

Figura 5.10b. Uma vez definida a área total ocupada pelos vazios na seção, é necessário definir o diâmetro dos poros para determinar a quantidade de partículas a serem simuladas. Mehta e Monteiro (2008) indicam os tamanhos dos diversos tipos de poros presentes em uma pasta de cimento hidratada (Figura 5.18), que são análogos aos vazios encontrados na matriz do concreto.

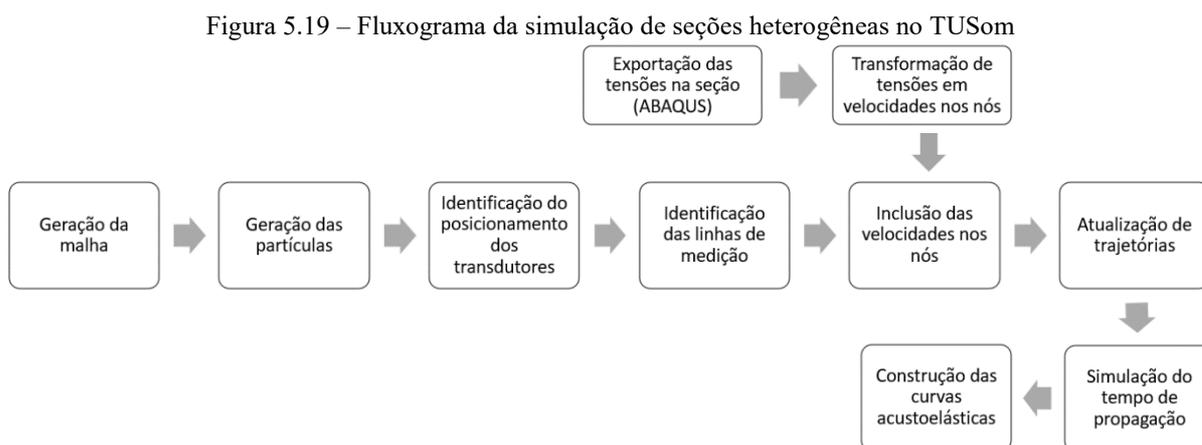


No ensaio de absorção, a água perdida pelo bloco se encontra nos poros de ar aprisionado e capilares. Para realizar a simulação, entretanto, assumiu-se que todos os vazios

correspondiam a poros de ar aprisionado a fim de reduzir o custo computacional. Considerou-se também que todos os poros eram circulares e que possuíam o mesmo diâmetro, equivalente a 2 mm. A área de cada vazio corresponde a 2,83 mm².

A partir dos resultados obtidos na seção homogênea, observou-se que a trajetória de propagação da onda não se afastou muito do centro do bloco. Portanto, para o modelo com material heterogêneo, apenas a região central da seção foi simulada. A seção homogênea foi discretizada com uma malha de 7 x 10 elementos, onde cada elemento tinha uma altura de 19 mm. Como o transdutor tem um diâmetro aproximado de 40 mm, não seria possível representar o ensaio realizado com apenas dois elementos na direção vertical, e a utilização de quatro elementos representaria um custo computacional mais elevado que o necessário. Neste sentido, a malha do bloco foi alterada no ABAQUS (simulação da distribuição de tensões) para que a seção tivesse 7 elementos horizontais x 8 elementos verticais. No TUSom, representou-se apenas a região central da seção, sendo modelados apenas 2 elementos verticais (47,5 mm de altura).

Finalmente, a área simulada da seção corresponde a 6650 mm², sendo 647,1 mm² sendo ocupados por 229 partículas circulares de 2 mm de diâmetro representando os vazios. Nas partículas, a velocidade de propagação foi considerada igual à velocidade de propagação de ondas sônicas no ar, 343 m/s. O fluxograma representando a sequência da simulação é mostrado na Figura 5.19.



Fonte: da autora

5.8 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foi apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento das simulações numéricas realizadas ao longo desta pesquisa.

Inicialmente, foi abordado o modelo desenvolvido com o auxílio da ferramenta computacional ABAQUS® com o objetivo de determinar a distribuição do campo de tensões em elementos de alvenaria ocos (blocos, prismas e pequenas paredes). Foram apresentadas as dimensões do bloco, o tipo de modelagem e o elemento finito adotados, as condições de contorno simuladas, os modelos de material utilizados para representar o bloco e a argamassa e a caracterização das interfaces.

Além disso, apresentou-se o modelo desenvolvido com a ferramenta TUSom com o objetivo de simular a passagem da onda ultrassônica pela seção do bloco de alvenaria. Descreveu-se a interface do programa e as análises utilizadas; o procedimento utilizado para determinar a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas na seção a partir da distribuição de tensões obtida no ABAQUS®; e o procedimento utilizado para simular a seção heterogênea, com consideração da porosidade do material.

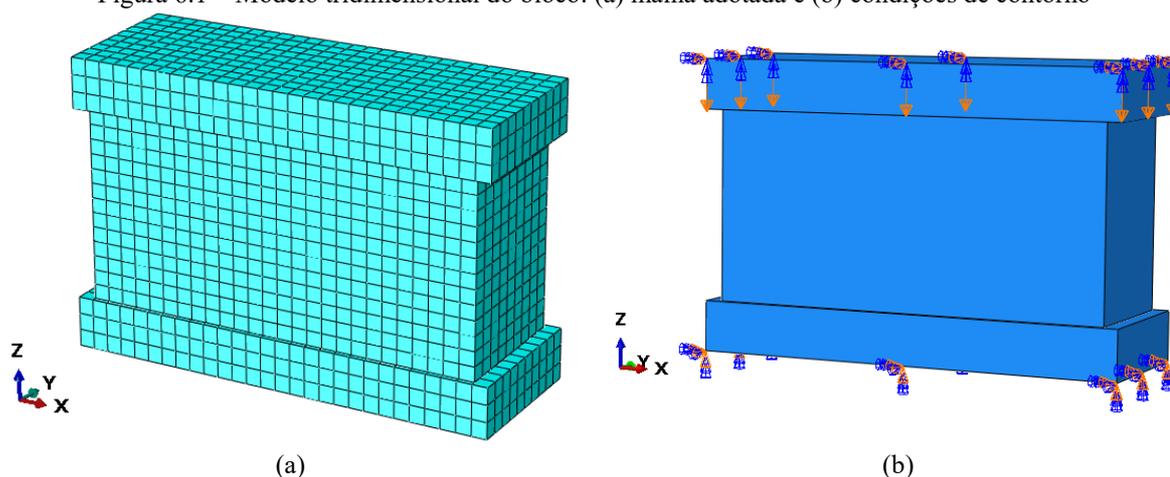
6. Resultados das simulações numéricas

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações numéricas realizadas com a utilização das ferramentas computacionais ABAQUS® (versão 2016) e TUSom. Os modelos foram desenvolvidos conforme descrito no Capítulo 5.

6.1 Distribuição de tensões no bloco de alvenaria

Os parâmetros de comportamento do material, a malha utilizada para discretizar o problema, o comportamento da interface entre o bloco e a placa metálica, e as condições de contorno foram definidos conforme descrito na metodologia. Nesta simulação, aplicou-se um deslocamento de 0,8 mm na face superior da placa metálica sobre o bloco, na direção negativa do eixo z. A malha e as condições de contorno do modelo são mostradas na Figura 6.1.

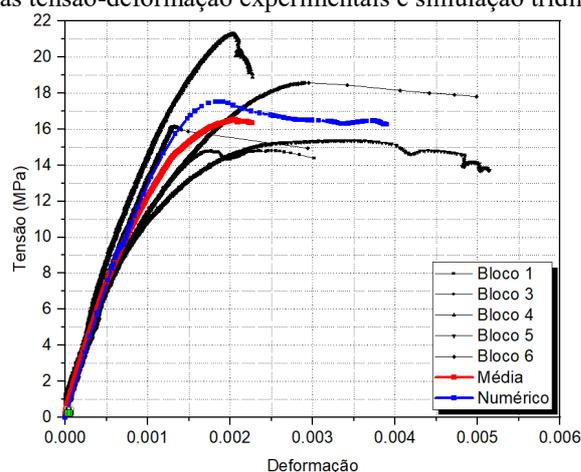
Figura 6.1 – Modelo tridimensional do bloco: (a) malha adotada e (b) condições de contorno



Fonte: da autora

A fim de verificar a correspondência entre o bloco simulado e o experimento real, a curva tensão-deformação numérica foi comparada à média e às curvas individuais experimentais dos blocos (Figura 6.2). A simulação mostrou boa concordância com o comportamento experimental, se mantendo dentro do intervalo descrito pelas curvas individuais dos blocos ensaiados. A tensão no modelo foi calculada a partir da soma das forças de reação em todos os nós da face inferior da placa metálica sob o bloco. Esse somatório foi dividido pela área bruta nominal do bloco. A deformação no bloco simulado foi calculada a partir do deslocamento diferencial entre nós posicionados nos locais instrumentados com os transdutores do tipo clip-gage nos ensaios de caracterização.

Figura 6.2 – Curvas tensão-deformação experimentais e simulação tridimensional do bloco



Fonte: da autora

Além da comparação visual, podemos quantificar a diferença entre a curva numérica e a curva experimental média a partir da diferença entre as tensões medidas nos dois modelos para uma mesma deformação aplicada (Tabela 6.1). A diferença máxima entre o modelo numérico e a tensão experimental média foi de cerca de 10%, aceitável para este tipo de simulação. Nos ensaios para avaliação do efeito acustoelástico, a tensão máxima aplicada foi de cerca de 10 MPa. Nesta região do gráfico, a diferença foi ainda menor, se mantendo inferior a 5% da tensão medida. Portanto, a partir da Figura 6.2 e da Tabela 6.1, podemos considerar que o modelo tridimensional para representação do carregamento estático do bloco está validado.

Tabela 6.1 – Diferença de tensão no bloco tridimensional entre dados experimentais e numéricos

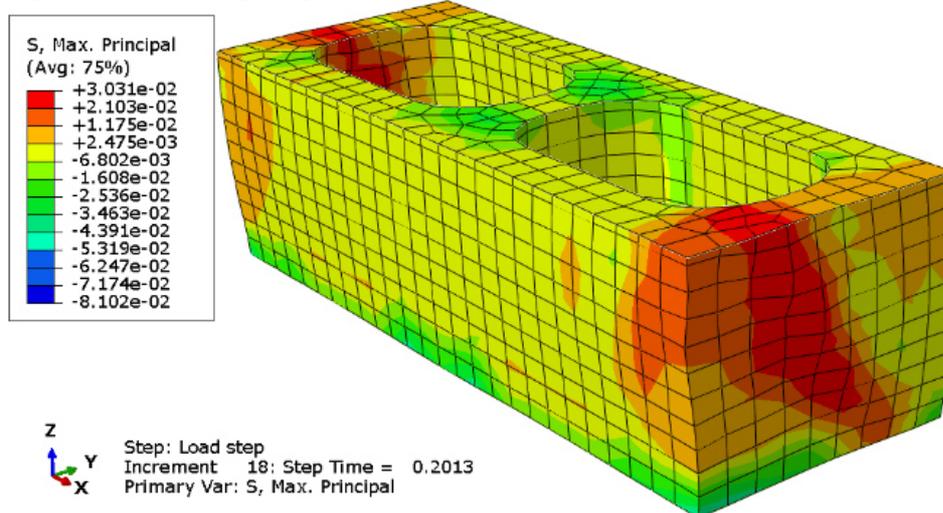
Deformação	Tensão experimental (MPa)	Tensão no modelo (MPa)	Diferença (%)
0,0004	6,17	5,98	-3,08%
0,0008	10,55	10,76	2,06%
0,0012	13,80	14,74	6,75%
0,0016	15,65	17,10	9,27%
0,0020	16,48	17,40	5,61%

Fonte: da autora

O campo de tensões principais máximas (Figura 6.3) e mínimas (Figura 6.4) são mostradas para o carregamento máximo aplicado durante o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (cerca de 10 MPa na seção bruta). Nas figuras, as placas metálicas foram omitidas e os blocos foram cortados a meia altura a fim de destacar a região de propagação da onda. As tensões são apresentadas em kN/cm². As simulações mostram uma tensão de compressão

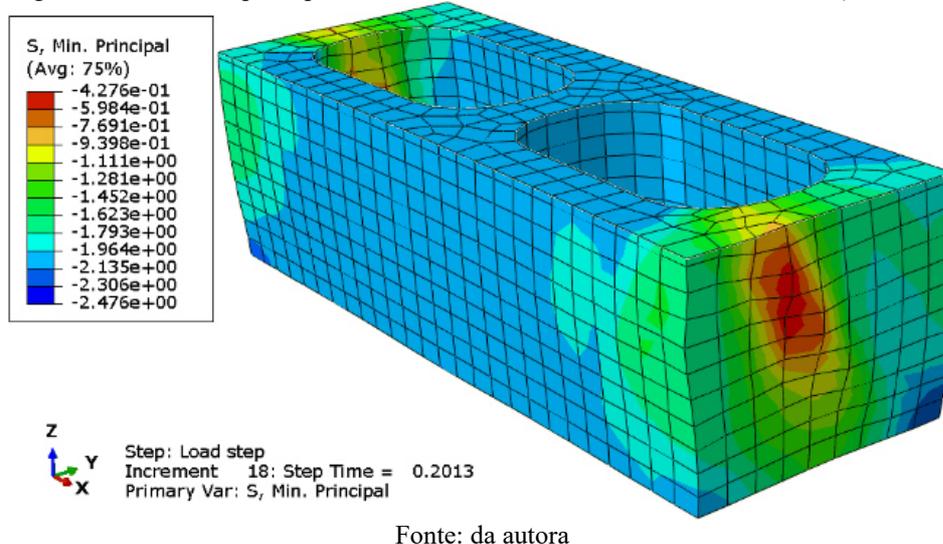
uniforme na direção de propagação da onda no centro do bloco. O septo externo apresenta tensões de tração de baixa magnitude, mas que podem influenciar a medição de tensões pelo ultrassom, uma vez que a onda de cisalhamento vai se propagar na direção tracionada.

Figura 6.3 – Tensões principais máximas no modelo tridimensional do bloco ($\varepsilon=0,75\%$)



Fonte: da autora

Figura 6.4 – Tensões principais mínimas no modelo tridimensional do bloco ($\varepsilon=0,75\%$)



Fonte: da autora

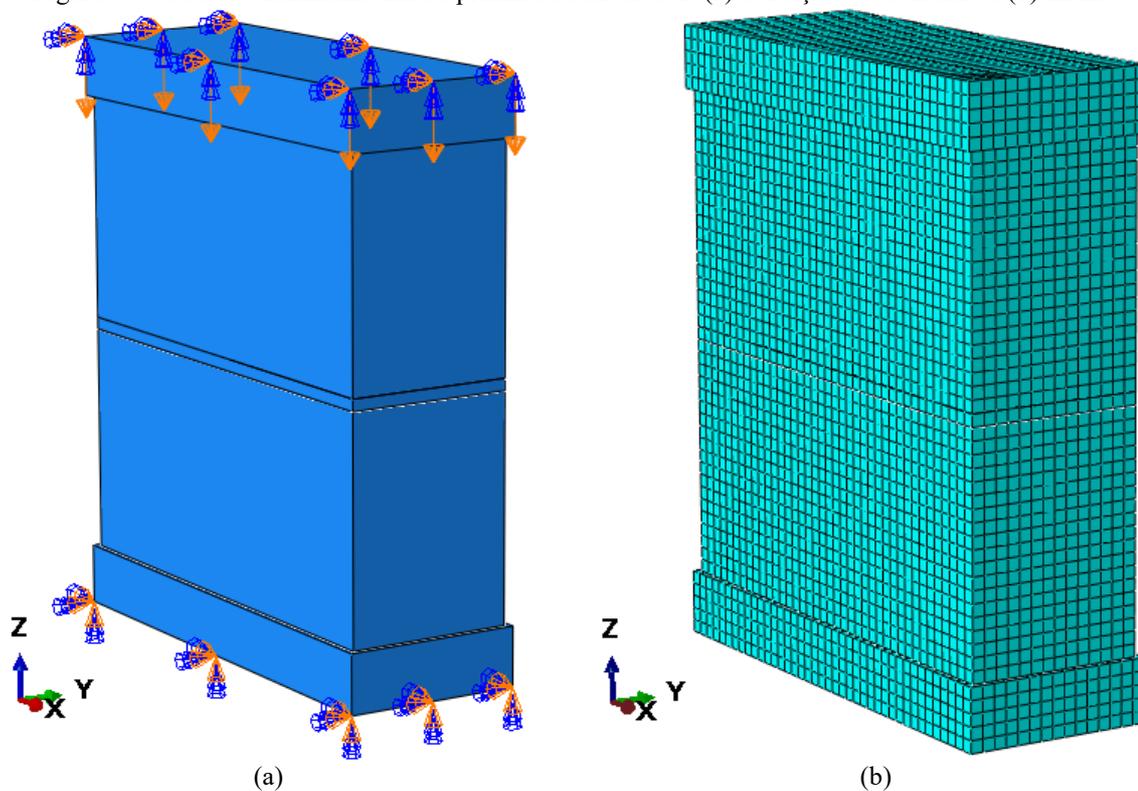
6.2 Distribuição de tensões no prisma de dois blocos

As simulações dos prismas foram realizadas a partir do modelo do bloco já validado, com a adição de uma camada de argamassa entre os blocos com 1 cm de espessura.

Foram mantidas as condições de contorno adotadas para o bloco, com o carregamento sendo aplicado como um deslocamento vertical na face superior da placa metálica posicionada sobre o bloco (Figura 6.5a). A malha adotada nos prismas foi composta de elementos

hexaédricos de 1 cm de lado, a fim de manter a uniformidade ao longo do prisma e da camada de argamassa (Figura 6.5b).

Figura 6.5 – Modelo tridimensional do prisma de dois blocos: (a) condições de contorno e (b) malha



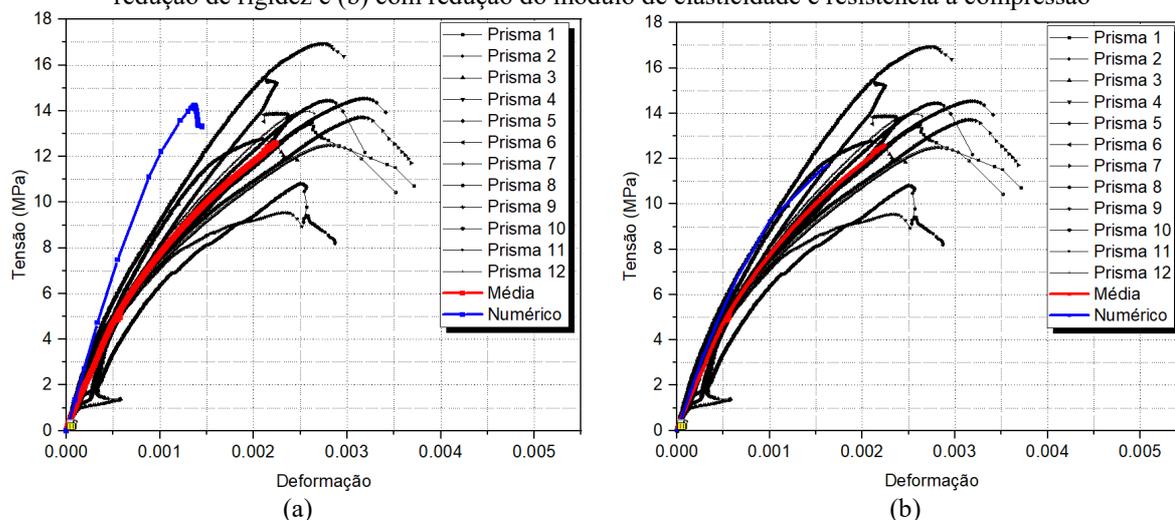
Fonte: da autora

A

Figura 6.6a mostra a curva tensão-deformação do prisma simulado com os parâmetros de resistência à compressão e módulo de elasticidade conforme determinados experimentalmente para os materiais isolados. Este modelo apresentou uma rigidez muito superior à rigidez dos resultados experimentais, ficando fora do intervalo delimitado pelas curvas individuais dos prismas. Portanto, este modelo não foi considerado uma representação válida do prisma real.

Conforme comentado no Capítulo 5, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade da argamassa foram reduzidos em 20%. Apesar desta redução, a rigidez do modelo continuava superior à do prisma experimental. Portanto, o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do bloco também foram penalizados em 20% a fim de considerar imperfeições geométricas do prisma e a falta de uma melhor caracterização experimental da interface, que provavelmente contribuiu para a maior rigidez da simulação. Essa redução foi mantida nas simulações posteriores (prisma de três blocos e pequena parede).

Figura 6.6 – Curvas tensão-deformação experimentais e simulação tridimensional do prisma de 2 blocos: (a) sem redução de rigidez e (b) com redução do módulo de elasticidade e resistência à compressão



Fonte: da autora

A Figura 6.6 mostra a curva tensão-deformação do modelo numérico com redução dos parâmetros mecânicos do bloco e da argamassa comparada às curvas experimentais individuais e média. A aproximação do resultado numérico da média experimental e a permanência da curva no intervalo definido pelas curvas individuais indicam que este modelo é mais correto para a representação do prisma comprimido que o modelo sem redução de rigidez mostrado na Figura 6.6a. A Tabela 6.2 mostra a diferença de tensão apresentada pelo modelo numérico e a média experimental para alguns valores de deformação.

Tabela 6.2 – Diferença de tensão no prisma de 2 blocos tridimensional entre dados experimentais e numéricos

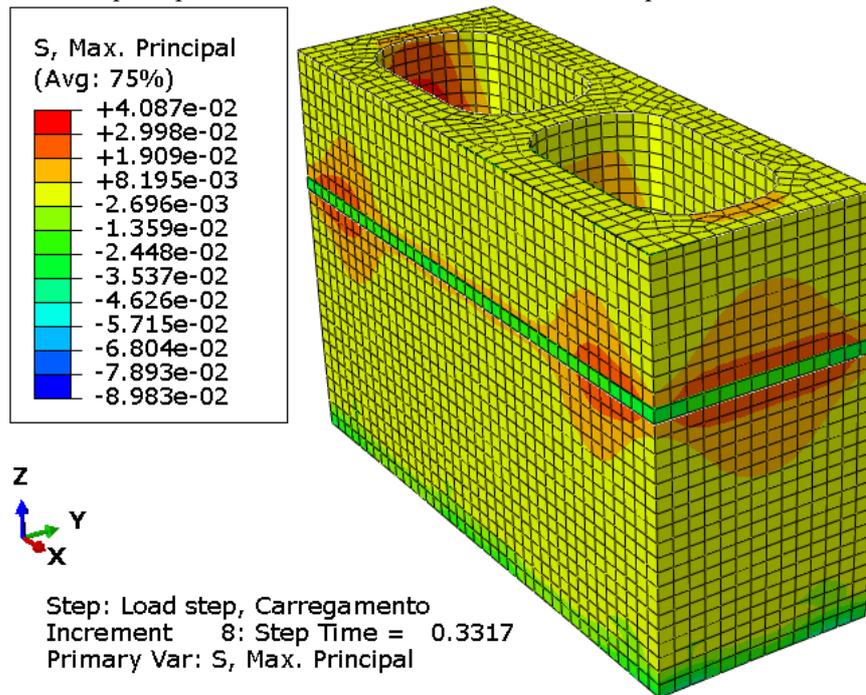
Deformação	Tensão experimental (MPa)	Tensão no modelo (MPa)	Diferença (%)
0,0004	3,87	4,44	14,9
0,0008	6,65	7,82	17,7
0,0012	8,71	10,05	15,4
0,0016	10,40	11,64	11,9

Fonte: da autora

A distribuição de tensões principais máximas e mínimas é mostrada na Figura 6.7 e na Figura 6.8, respectivamente, quando o carregamento aplicado é de 6,3 MPa, próximo ao carregamento máximo aplicado durante o ensaio de ultrassom. O modelo foi cortado a meia altura do bloco superior para destacar a região de propagação da onda. Como a distribuição de tensões foi simétrica ao longo da altura do prisma, optou-se por mostrar o corte em apenas um dos blocos. As zonas de tensão de tração observadas na Figura 6.7 estão localizadas nos locais

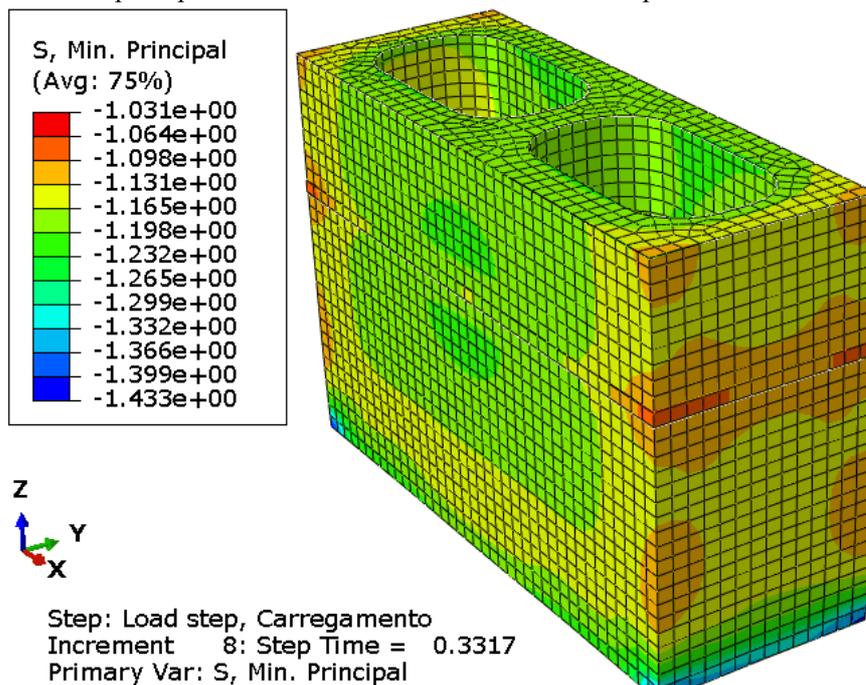
de ruptura observados no ensaio de caracterização, onde fissuras se desenvolveram nos septos externos e nos quartos da maior dimensão do bloco (Figura 4.5). Essa correspondência indica que o modelo simulado representa adequadamente os prismas submetidos ao ensaio de compressão uniaxial.

Figura 6.7 – Tensões principais máximas no modelo tridimensional do prisma de dois blocos ($\varepsilon=0,58\%$)



Fonte: da autora

Figura 6.8 – Tensões principais mínimas no modelo tridimensional do prisma de dois blocos ($\varepsilon=0,58\%$)

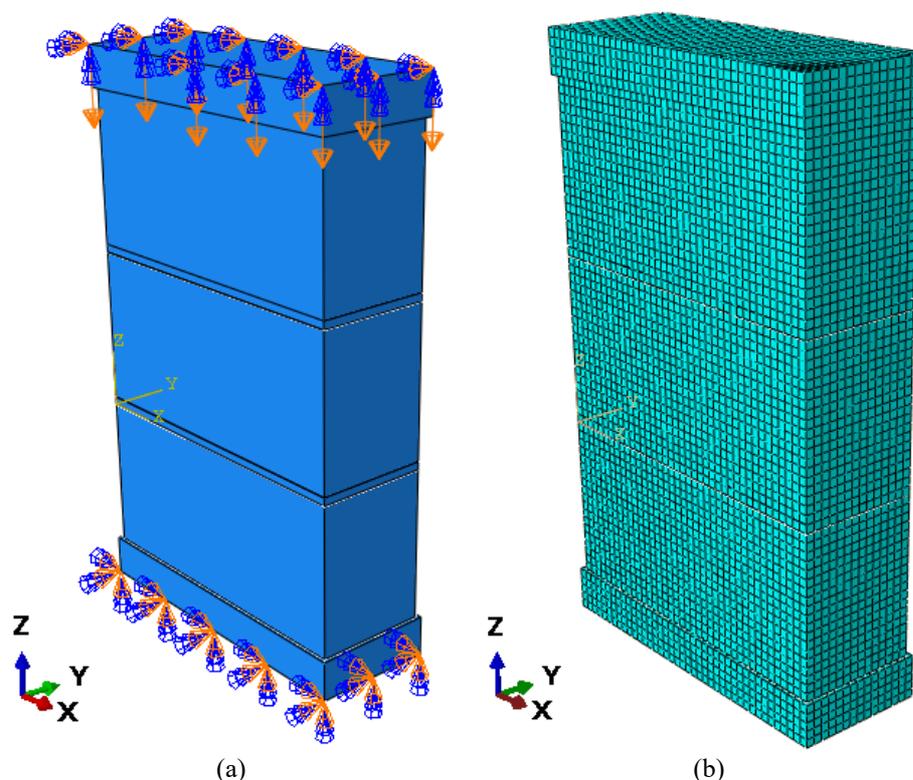


Fonte: da autora

6.3 Distribuição de tensões no prisma de três blocos

Na simulação do prisma de três blocos, foram mantidos todos os parâmetros adotados para a simulação dos prismas de dois blocos, incluindo a caracterização dos materiais com redução do módulo de elasticidade e resistência à compressão do concreto e da argamassa e as características das interfaces. Novamente, as condições de contorno foram aplicadas às faces externas das placas metálicas superior e inferior (Figura 6.9a). Adotou-se para o prisma de três blocos a mesma malha utilizada na simulação anterior (Figura 6.9b).

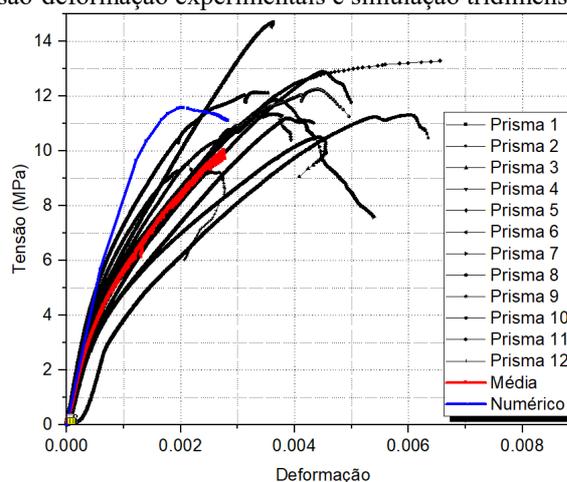
Figura 6.9 – Modelo tridimensional do prisma de três blocos: (a) condições de contorno e (b) malha



Fonte: da autora

A comparação entre as curvas tensão-deformação do modelo numérico e os resultados experimentais é mostrada na Figura 6.10. Embora a curva numérica esteja fora do intervalo delimitado pelas curvas individuais para tensões acima de 6 MPa, aproximadamente, e as diferenças de tensão entre modelo experimental e numérico sejam significativas (Tabela 6.3), o trecho de interesse da simulação corresponde apenas ao carregamento aplicado durante os ensaios de UPV (tensão de compressão inferior a 7 MPa). Neste sentido, a modelagem foi considerada suficientemente representativa da distribuição de tensões ao longo do experimento de ultrassom.

Figura 6.10 – Curvas tensão-deformação experimentais e simulação tridimensional do prisma de 3 blocos



Fonte: da autora

Tabela 6.3 – Diferença de tensão no prisma de 3 blocos tridimensional entre dados experimentais e numéricos

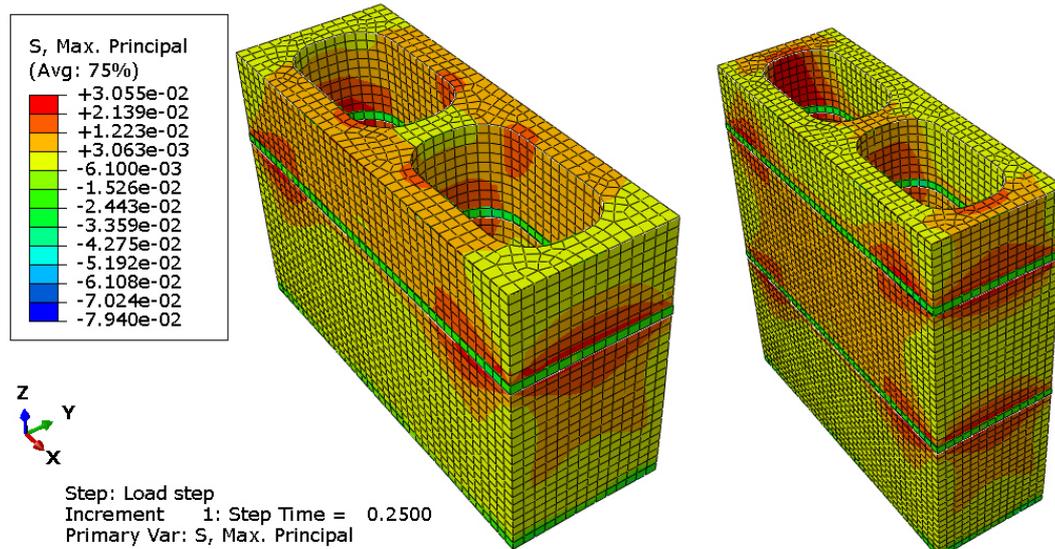
Deformação	Tensão experimental (MPa)	Tensão no modelo (MPa)	Diferença (%)
0,0005	4,83	3,64	32,6
0,0010	8,27	5,67	45,9
0,0015	10,66	7,17	48,8
0,0020	11,58	8,41	37,6
0,0025	11,39	9,44	20,7

Fonte: da autora

As tensões principais máximas e mínimas no prisma de três blocos quando a tensão aplicada corresponde a 5,7 MPa são mostradas na Figura 6.11 e na Figura 6.12, respectivamente. As regiões de meia altura do bloco superior e intermediário foram destacadas por serem as regiões de propagação da onda. Não foi mostrado o corte no bloco inferior devido à simetria da distribuição de tensões.

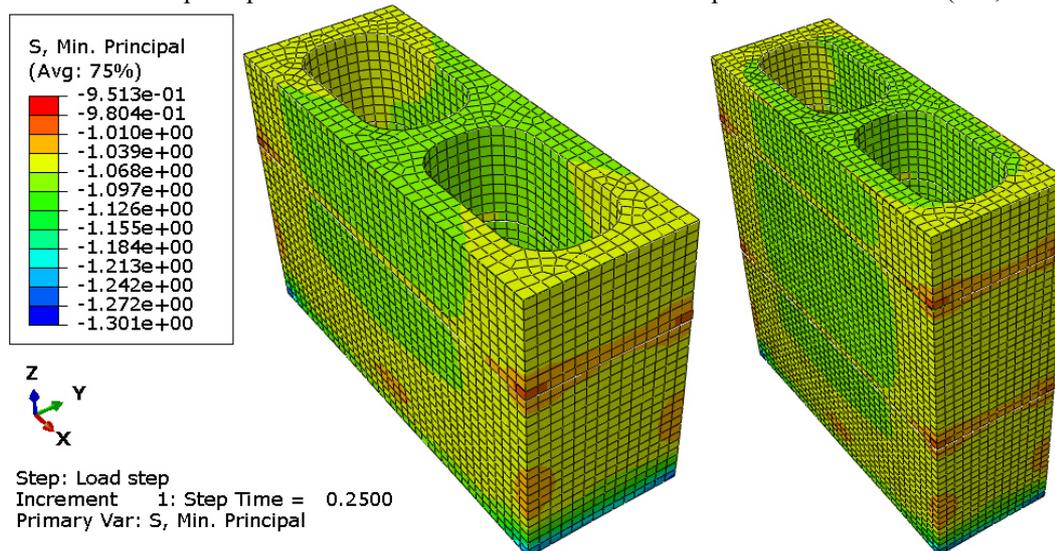
A Figura 6.11 mostra o desenvolvimento de tensões de tração nos septos externos dos blocos de extremidade e na maior dimensão do bloco central. Esses locais correspondem aos de formação de fissura mostrados na Figura 4.6. Na Figura 6.12, a simulação indica que os septos dos três blocos estão sujeitos a compressão constante ao longo do trecho entre transdutores, com um valor de tensão maior nos septos centrais.

Figura 6.11 – Tensões principais máximas no modelo tridimensional do prisma de três blocos ($\epsilon=0,59\%$)



Fonte: da autora

Figura 6.12 – Tensões principais mínimas no modelo tridimensional do prisma de três blocos ($\epsilon=0,59\%$)



Fonte: da autora

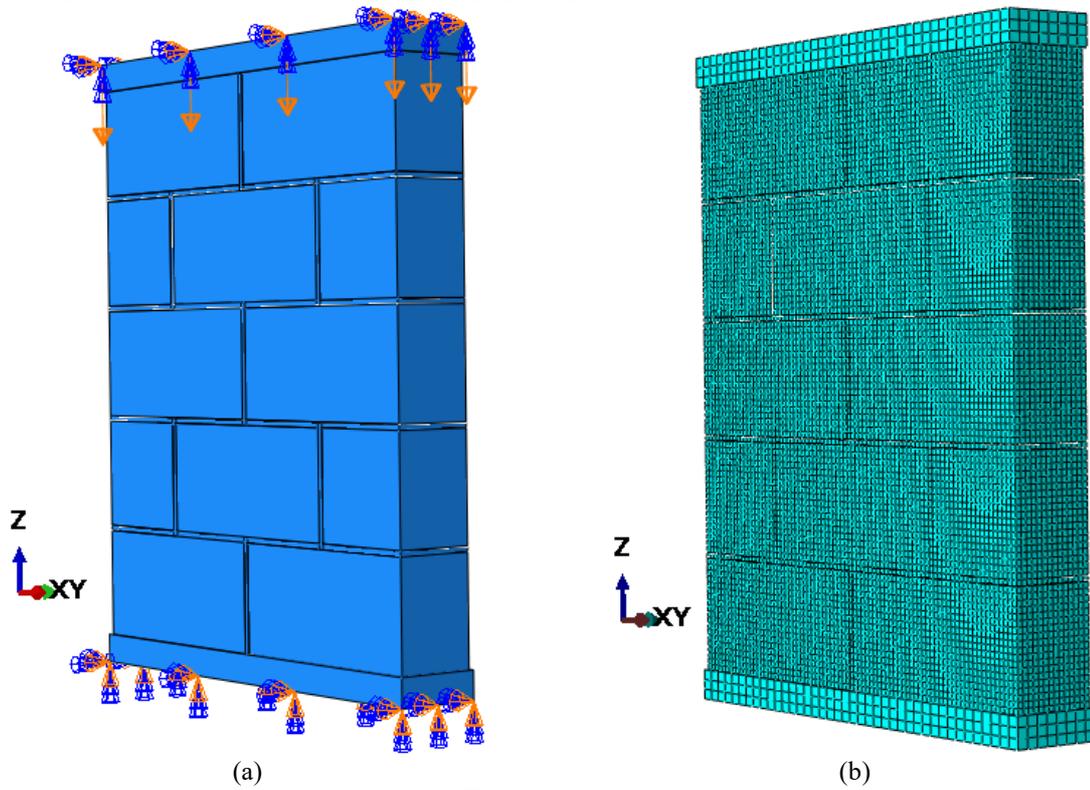
6.4 Distribuição de tensões na pequena parede

Na simulação da pequena parede, foram mantidos os parâmetros já utilizados na simulação dos prismas. As interfaces verticais foram caracterizadas por meio dos mesmos parâmetros utilizados na descrição das interfaces horizontais. As juntas verticais foram modeladas com espessura de 1 cm e as placas metálicas nas extremidades superior e inferior da parede têm dimensões de 80 cm x 15 cm x 5 cm. As condições de contorno e a malha adotadas são mostradas na Figura 6.13.

A comparação entre as curvas tensão-deformação numérica e experimentais é mostrada na Figura 6.14. A simulação mostra boa concordância com os resultados experimentais,

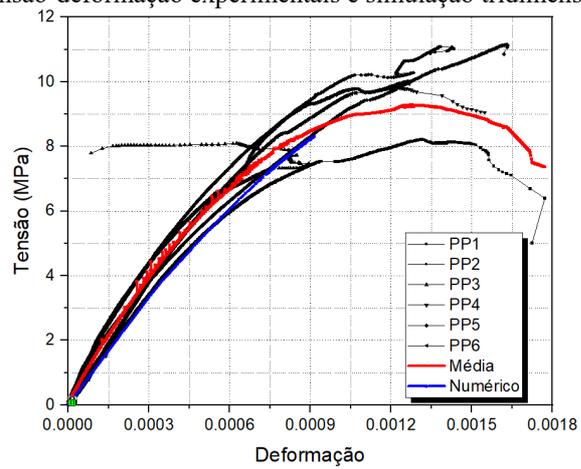
conforme apresentado nas curvas tensão-deformação e na Tabela 6.4. A partir destes resultados, o modelo numérico foi considerado validado.

Figura 6.13 – Modelo tridimensional da pequena parede: (a) condições de contorno e (b) malha



Fonte: da autora

Figura 6.14 – Curvas tensão-deformação experimentais e simulação tridimensional da pequena parede



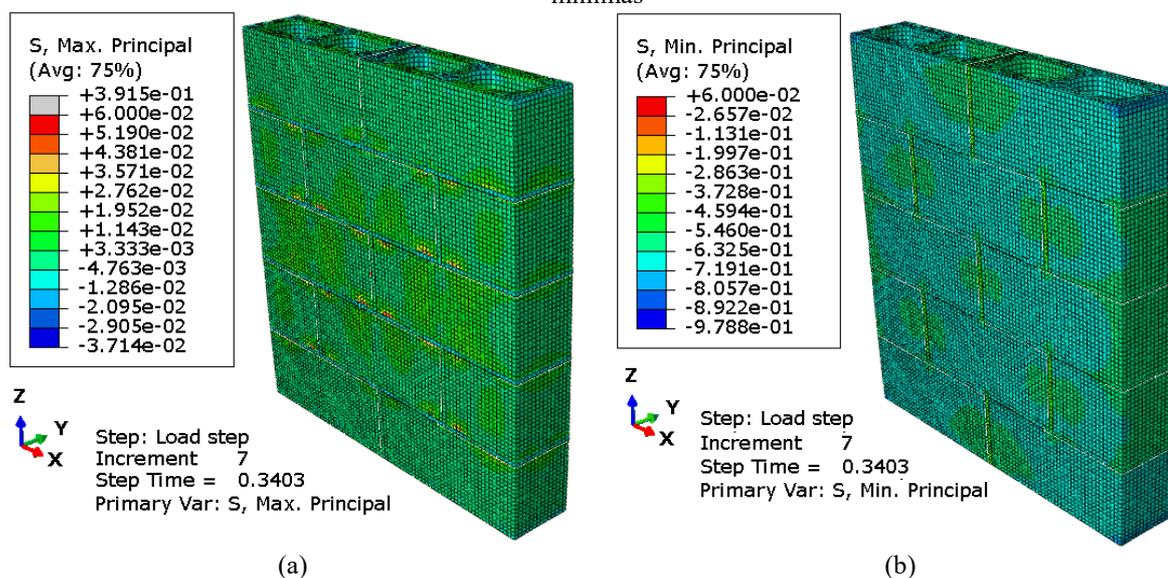
Fonte: da autora

Tabela 6.4 – Diferença de tensão na pequena parede entre dados experimentais e numéricos

Deformação	Tensão experimental (MPa)	Tensão no modelo (MPa)	Diferença (%)
0,0002	2,77	2,23	19,4
0,0004	4,98	4,30	13,7
0,0006	6,66	6,06	9,0
0,0008	8,00	7,58	5,3
0,0009	8,47	8,21	3,1

Fonte: da autora

Na análise experimental, o carregamento máximo aplicado será de, aproximadamente, 50% da resistência à compressão característica da parede, ou seja, cerca de 3,6 MPa. A Figura 6.15 mostra a distribuição de tensões principais máximas e mínimas no modelo da pequena parede com uma tensão aplicada de 3,4 MPa. A simulação indica uma distribuição uniforme de tensões, com diminuição da compressão nos septos externos dos blocos.

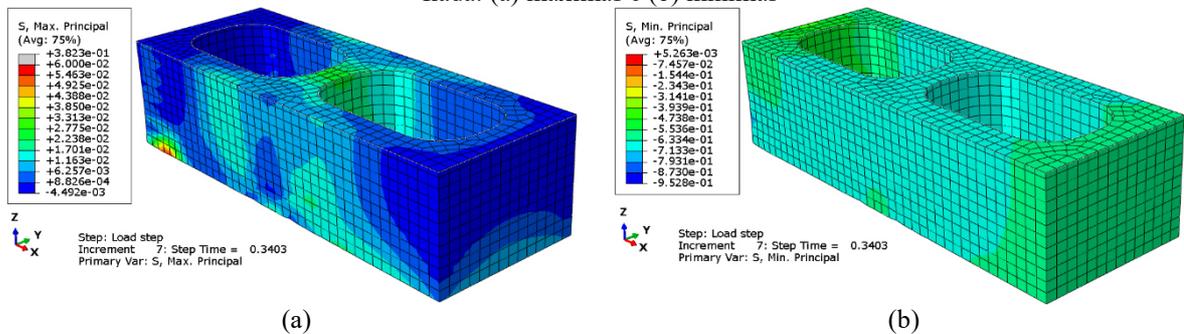
Figura 6.15 – Tensões principais no modelo tridimensional da pequena parede ($\epsilon=0,31\%$): (a) máximas e (b) mínimas

Fonte: da autora

Os ensaios de ultrassom serão realizados nos septos centrais dos blocos inteiros da segunda, terceira e quarta fiadas. Sendo a distribuição de tensões simétrica em relação à altura da parede, as tensões principais são iguais nos blocos de segunda e quarta fiada. Neste sentido, apenas a distribuição de tensão a meia altura dos blocos de terceira e quarta fiada serão destacadas na Figura 6.16 e na Figura 6.17. Os septos centrais estão sujeitos a compressão constante e, embora exista uma tensão de tração no caminho da propagação direta da onda, esta

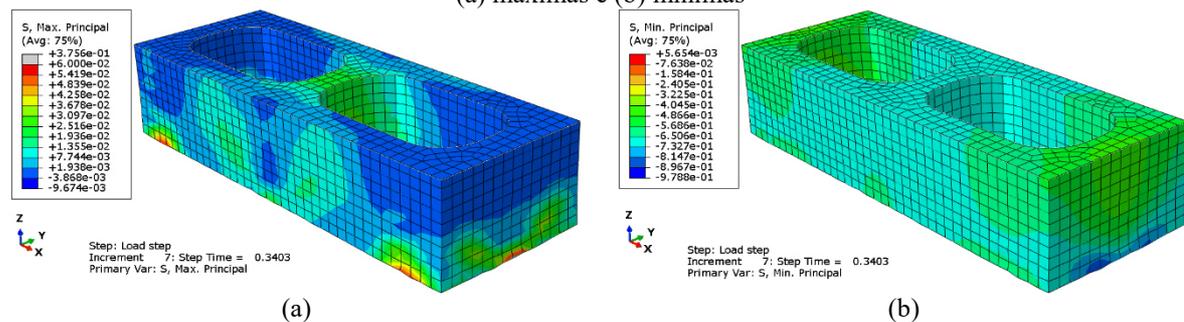
não apresenta grande magnitude. Portanto, os dados obtidos por meio da simulação numérica indicam que os septos escolhidos são adequados à avaliação do efeito acustoelástico.

Figura 6.16 – Tensões principais no modelo tridimensional da pequena parede ($\epsilon=0,31\%$), bloco da terceira fiada: (a) máximas e (b) mínimas



Fonte: da autora

Figura 6.17 – Tensões principais no modelo tridimensional da pequena parede ($\epsilon=0,31\%$), bloco da quarta fiada: (a) máximas e (b) mínimas



Fonte: da autora

6.5 Efeito acustoelástico em seções do bloco

Foram realizadas simulações dos ensaios de ultrassom realizados em blocos no regime elástico por meio do software TUSom, conforme descritas na metodologia. Nesta etapa, as seções dos septos externo e interno do bloco foram modeladas a partir das distribuições de tensões gerada pela aplicação de carregamentos de compressão uniaxial, determinadas com o auxílio da ferramenta ABAQUS[®], conforme descrito no capítulo 5 (Figura 6.18)

Uma vez determinada a distribuição de tensões a partir do modelo desenvolvido, utilizou-se a variação de velocidade encontrada com os ensaios de VPU em blocos solicitados dentro do regime elástico para determinar a equação de regressão linear da curva acustoelástica (Figura 6.19). A equação que define a reta mostrada na Figura 6.19 corresponde à Equação (6.1), com coeficiente de determinação R^2 igual a 0,97. Por simplificação, adotou-se a Equação (6.2). Adotou-se como velocidade inicial V_0 o valor determinado a partir dos ensaios experimentais, igual a 4390,38 m/s.

Figura 6.18 – Distribuição de tensões na seções (tensão de compressão aplicada: 0,476 kN/cm²): (a) septo externo e (b) septo interno

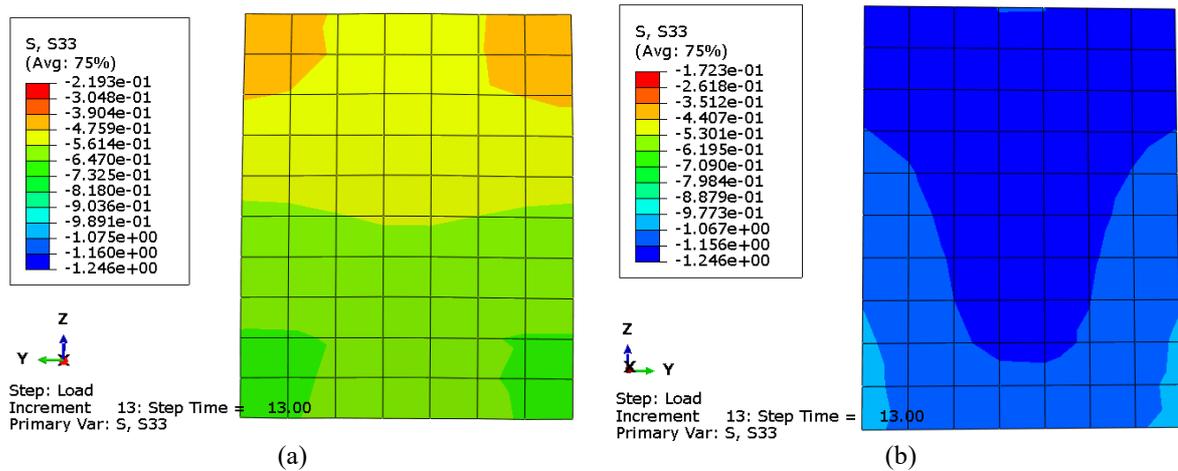
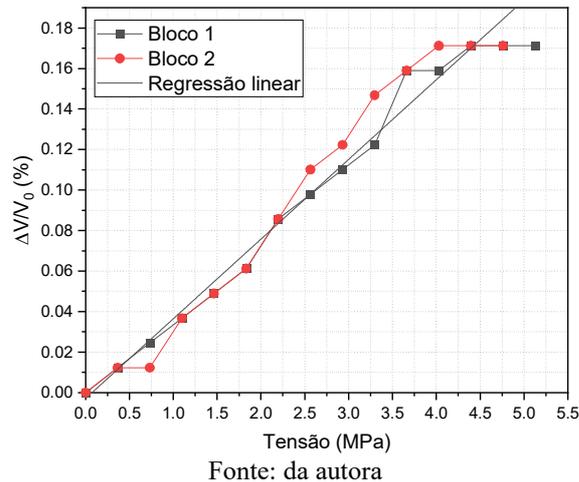


Figura 6.19 – Regressão linear da curva acustoelástica referentes aos blocos 1 e 2, regime elástico

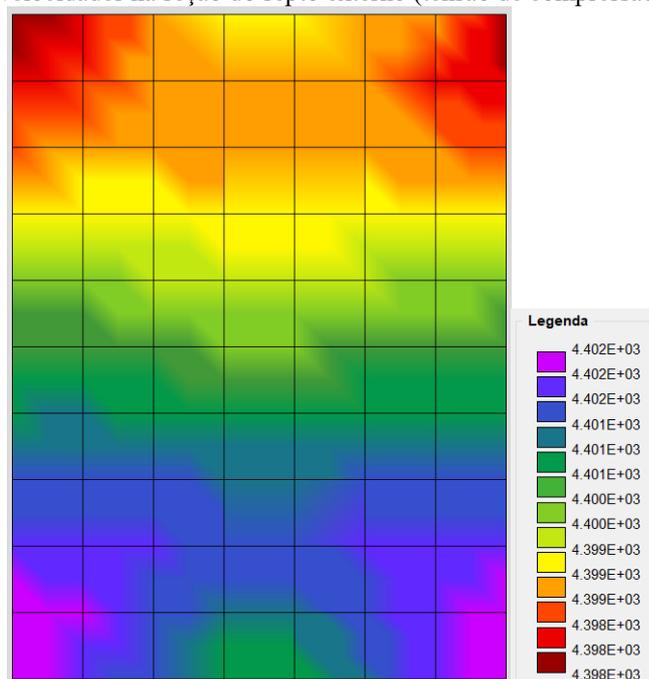


$$y = 3,934 \cdot 10^{-2}x - 0,292 \cdot 10^{-2} \quad (6.1)$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 4 \cdot 10^{-2}\sigma \quad (6.2)$$

Logo, aplicando a Equação (6.2) aos valores de tensão de compressão nos nós da seção mostrada na Figura 6.18, é possível montar um mapa de velocidade de propagação de onda mecânica na seção. A visualização deste mapa pode ser feita com o auxílio do programa TUSom (Figura 6.20).

Figura 6.20 – Mapa de velocidades na seção do septo externo (tensão de compressão aplicada: 0,476 kN/cm²)



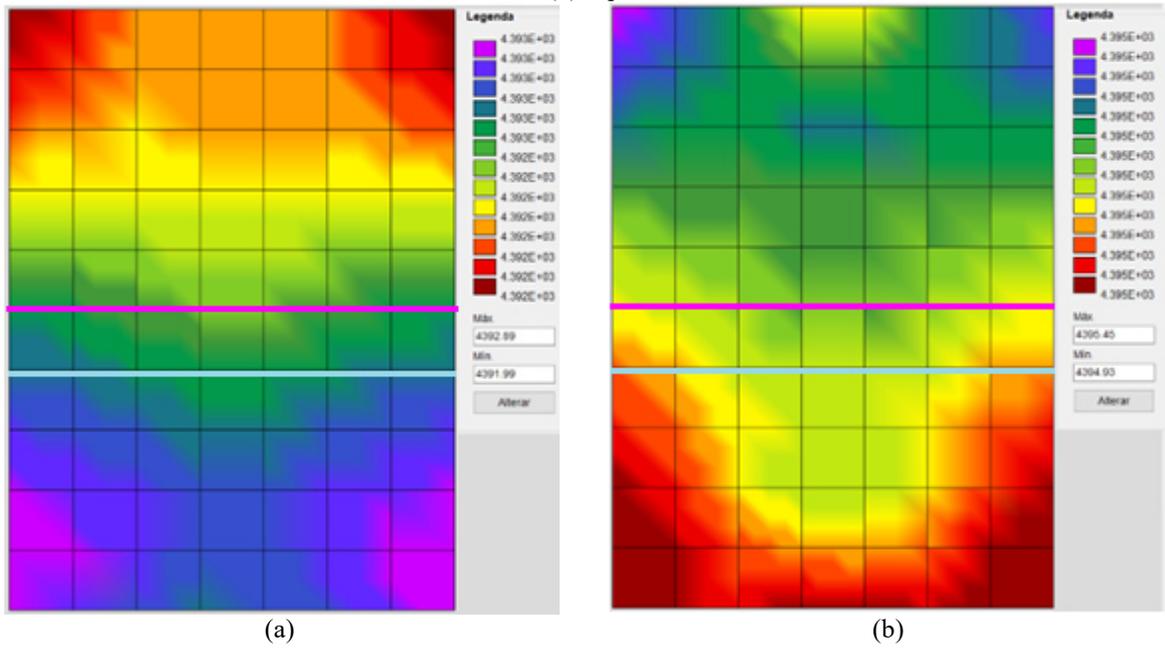
Fonte: da autora

Para cada modelo, foi realizada a análise de atualização de trajetórias e, a partir da trajetória atualizada, realizou-se uma nova simulação de tempo. Nestas simulações, utilizou-se a quantidade máxima de nós auxiliares.

Nestas seções, a atualização de trajetórias se manteve linear. No entanto, a trajetória otimizada se deslocou do centro do transdutor para seu limite inferior, dado que a tensão e, conseqüentemente, a velocidade de propagação são maiores nesta região. A linha de medição (horizontal, no centro da seção) e a trajetória de propagação atualizada (linha horizontal azul) são mostradas para diferentes níveis de tensão na Figura 6.21, Figura 6.22 e Figura 6.23.

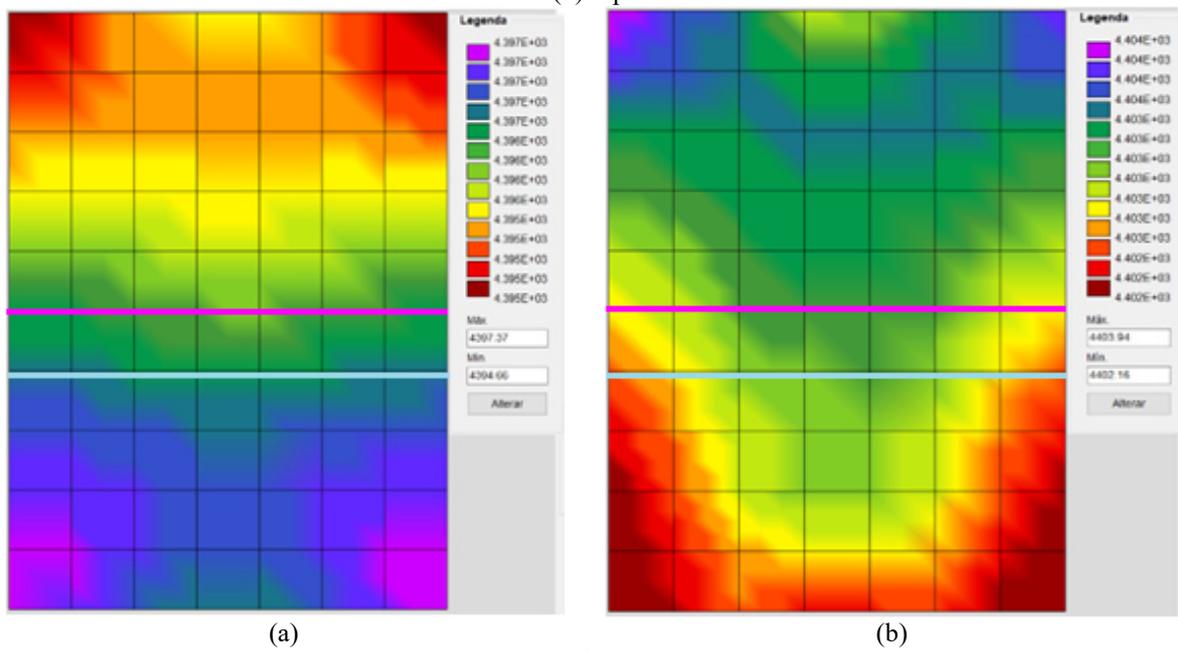
A comparação entre as curvas de variação relativa de velocidade por nível de tensão aplicada obtidas experimentalmente e numericamente são mostradas na Figura 6.24. A Figura 6.24a mostra uma boa correspondência entre os resultados experimentais e numéricos; na Figura 6.24b, apenas o resultado experimental referente ao Bloco 2 mostrou boa concordância com a curva numérica. Conforme mostrado no item 7.1, a tensão de compressão não é distribuída igualmente entre os septos interno e externo dos blocos. Por outro lado, a simulação pressupõe que o material não varia com o carregamento (o coeficiente acustoelástico é mantido constante). Logo, é possível supor que a simulação represente melhor a região do septo externo, que estava submetida a uma tensão menor. Apesar do nível de tensão relativamente baixo, a concentração de tensão e a aplicação de ciclos de pré-carregamento podem ter contribuído para aumentar a danificação do material na região do septo central.

Figura 6.21 – Trajetória atualizada para seções com tensão de compressão aplicada de 1,10 MPa: (a) septo externo e (b) septo interno



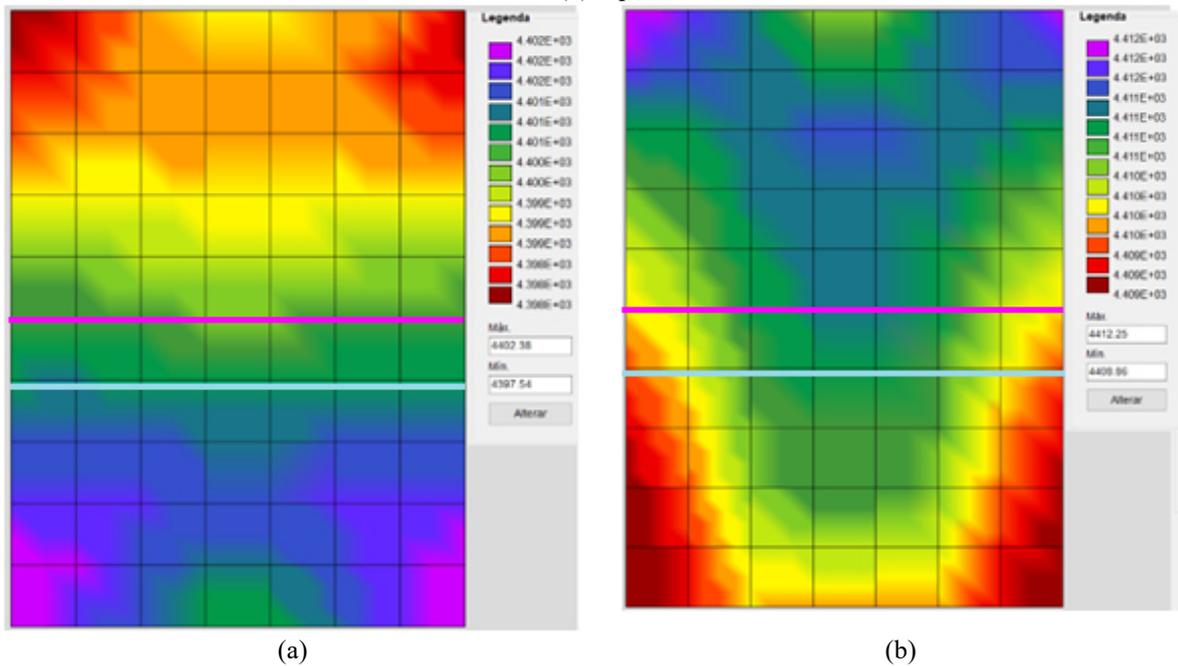
Fonte: da autora

Figura 6.22 – Trajetória atualizada para seções com tensão de compressão aplicada de 2,93 MPa: (a) septo externo e (b) septo interno



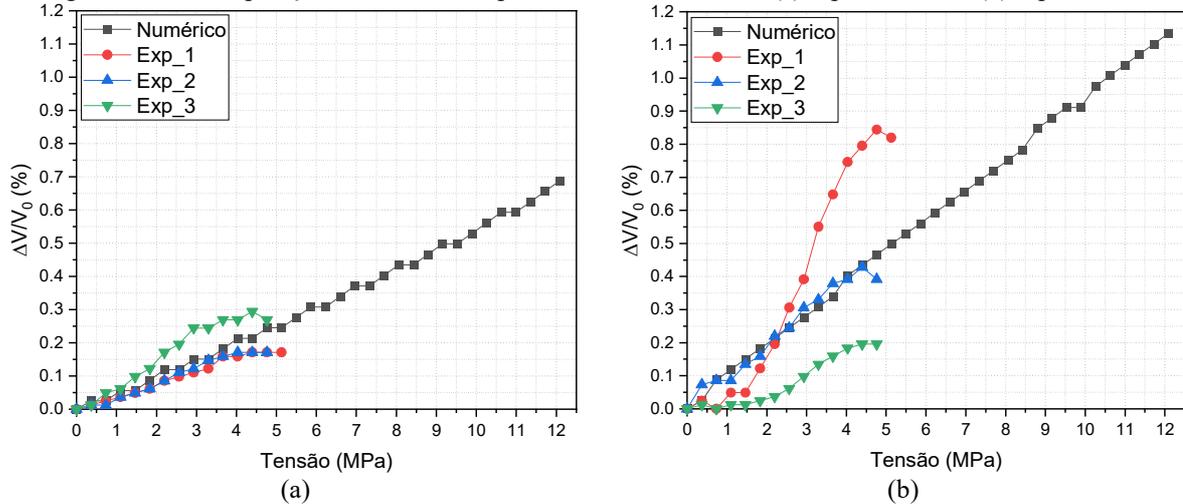
Fonte: da autora

Figura 6.23 – Trajetória atualizada para seções com tensão de compressão aplicada de 4,76 MPa: (a) septo externo e (b) septo interno



Fonte: da autora

Figura 6.24 – Comparação entre curvas experimentais e numéricas: (a) septo externo e (b) septo interno



Fonte: da autora

Na simulação das duas seções, utilizou-se a Equação (6.2) para transformar a distribuição de tensões em distribuição de velocidades. No entanto, a partir dos gráficos da Figura 6.24, podemos observar que a curva acustoelástica teve uma inclinação diferente nas duas seções. As equações de regressão linear para as curvas numéricas referente ao septo externo e ao septo interno são mostradas nas Equações (6.3) e (6.4), respectivamente.

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 5,65 \cdot 10^{-2} \sigma \quad r^2 = 0,994 \quad (6.3)$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 9,35 \cdot 10^{-2} \sigma \quad r^2 = 0,999 \quad (6.4)$$

O bloco de alvenaria possui uma geometria mais complexa que os corpos de prova de concreto padronizados utilizados normalmente em ensaios de laboratório (cilíndricos, cúbicos ou prismáticos). Desse modo, mesmo com a utilização de chapas de aço para a distribuição de carregamento e com uma compressão aplicada relativamente baixa, ocorreu uma maior concentração de tensão na região central do bloco. Essa variação de tensão ao longo da estrutura do bloco dificulta a obtenção experimental de um coeficiente acustoelástico único para o material. É importante ressaltar que esta simulação é simplificada, sem consideração da variação de homogeneidade do material, nem presença de fissuras. Neste sentido, todas as variações de resultados são decorrentes da variação de tensão na seção.

Um outro ponto a ser comentado é que nenhuma das simulações retornou o mesmo coeficiente acustoelástico utilizado inicialmente para a Equação (6.2). Embora o modelo tenha gerado curvas acustoelásticas similares aos resultados experimentais para níveis baixos de tensão aplicada no septo externo, o valor do coeficiente acustoelástico sofreu uma pequena variação. Novamente, essa diferença pode ser explicada pela distribuição de tensão ao longo da estrutura do bloco.

Blocos de alvenaria correspondem a pequenas estruturas feitas de concreto. Logo, ensaios em blocos analisam o comportamento da estrutura e não apenas do material. A vantagem óbvia é conhecer o comportamento da unidade que será utilizada na construção de paredes. Por outro lado, a caracterização do material que forma o bloco tem menor precisão, uma vez que o material está aplicado em uma estrutura. Um exemplo de conclusão decorrente disso é a de que o módulo de elasticidade calculado durante o ensaio de compressão do bloco não corresponde ao módulo de elasticidade do concreto (material do bloco). De modo análogo, o coeficiente acustoelástico encontrado no bloco provavelmente não corresponde ao coeficiente acustoelástico que seria encontrado experimentalmente para um corpo de prova do mesmo material.

Embora essas considerações sejam importantes, é necessário ressaltar que ensaiar o material do bloco traria outras complicações, como a dificuldade de obtenção do corpo de prova. As características do concreto dependem da sua compactação durante o processo de fabricação do bloco, portanto, corpos de prova representativos em outros formatos teriam que ser moldados com a mesma compactação. Para extrair corpos de prova do bloco já curado, seria

necessário cortar uma amostra, processo que poderia danificar o material, além de gerar um corpo de prova pequeno, inviável para ensaios de ultrassom.

O comportamento do gráfico variação relativa de velocidade por tensão aplicada se manteve linear mesmo para altas tensões de compressão aplicadas. O modelo de material utilizado no ABAQUS® para simulação das tensões foi não-linear, conforme descrito na metodologia. No entanto, como as simulações desprezaram a presença de dano localizado e considerou-se o efeito acustoelástico dado pela relação linear entre tensão e variação de velocidade, o comportamento acustoelástico se manteve retilíneo ao longo das simulações.

6.6 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foram apresentadas as simulações numéricas realizadas ao longo do trabalho. Mostrou-se que o comportamento dos elementos de alvenaria foi validado a partir dos ensaios de caracterização e que se obteve a distribuição de tensão nestes elementos durante os ensaios ultrassônicos.

Apresentou-se também a validação do modelo numérico desenvolvido no TUSom a partir dos ensaios realizados em blocos dentro do regime linear da curva tensão-deformação. As seções foram consideradas homogêneas e foram simuladas as curvas acustoelásticas dos septos externo e interno. Embora tenha ocorrido uma boa concordância entre os resultados experimentais e numérico no septo externo, o mesmo não ocorreu no septo interno, que estava sujeito a uma maior tensão de compressão. A simulação ilustra uma das dificuldades na determinação do coeficiente acustoelástico de estruturas como blocos, em que a distribuição de tensão não é uniforme ao longo da peça. Regiões diferentes estão submetidas a históricos de carregamento e estados de danificação diferentes, dificultando a determinação de um coeficiente acustoelástico único para a estrutura.

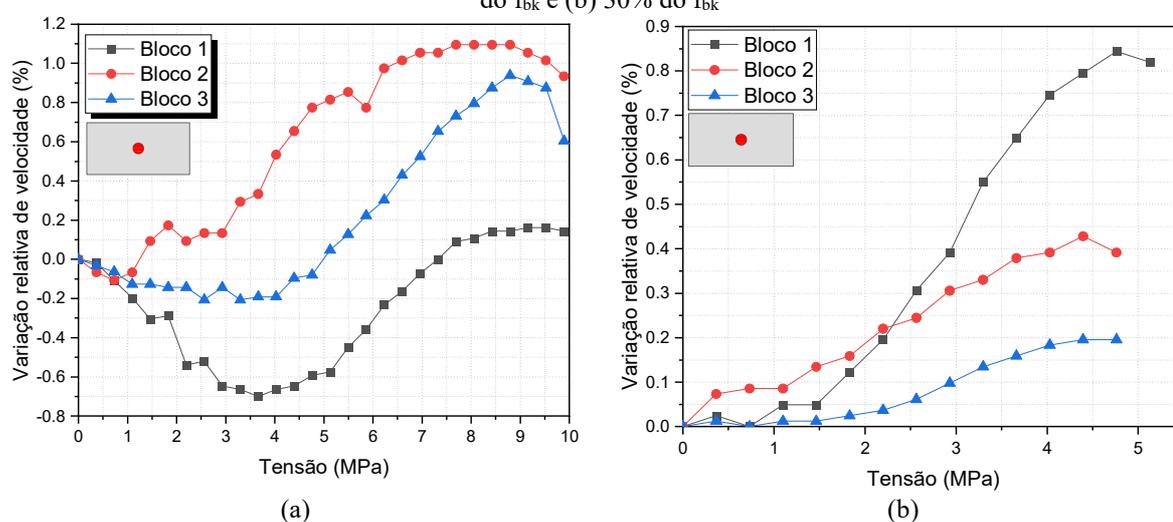
7. Análise de resultados e discussões

Neste capítulo, são apresentadas discussões acerca dos resultados experimentais e numéricos obtidos ao longo do trabalho.

7.1 Distribuição de tensões durante os ensaios de acustoelasticidade

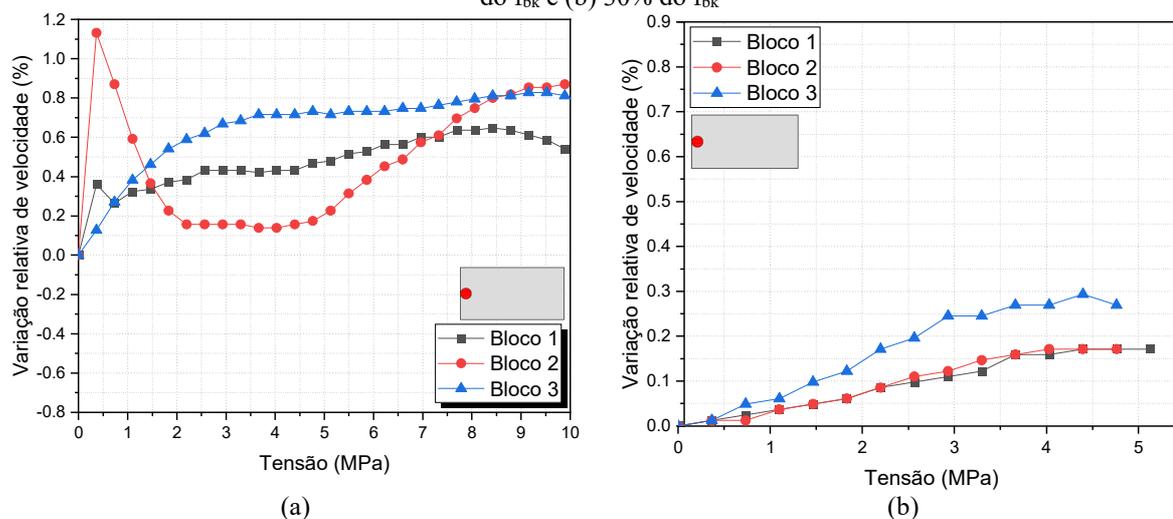
A Figura 7.1 e a Figura 7.2 mostram as curvas acustoelásticas obtidas nos septos internos e externos, respectivamente, de blocos submetidos a compressão uniaxial.

Figura 7.1 – Curvas acustoelásticas obtidas nos septos internos dos blocos, tensão máxima aplicada de: (a) 70% do f_{bk} e (b) 30% do f_{bk}



Fonte: da autora

Figura 7.2 – Curvas acustoelásticas obtidas nos septos externos dos blocos, tensão máxima aplicada de: (a) 70% do f_{bk} e (b) 30% do f_{bk}



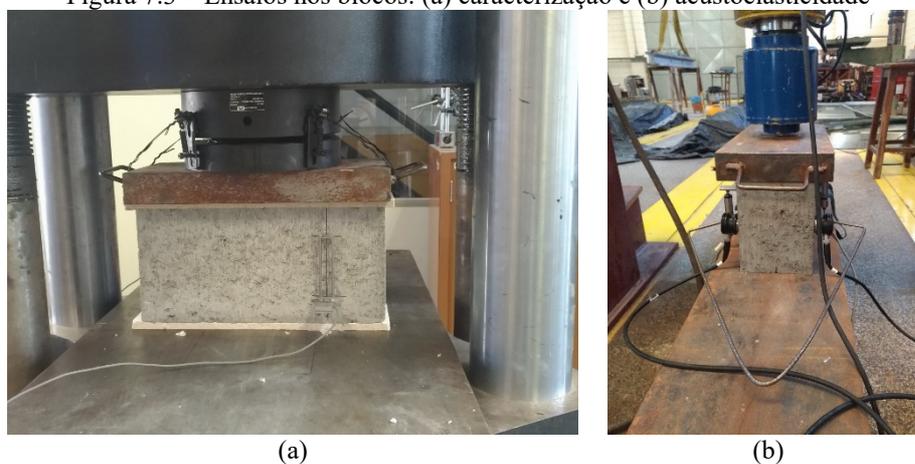
Fonte: da autora

Além da influência do nível de tensão máxima aplicado nos blocos sobre a resposta acustoelástica, é possível observar que a dispersão de resultados foi bem inferior nos septos

externos, em comparação com os internos. Com uma distribuição uniforme dos deslocamentos, conforme simulado no modelo tridimensional, é esperado que os septos externos apresentem maiores tensões de tração que os septos centrais, gerando maior danificação nesta região e levando a uma maior variação no comportamento do material.

No entanto, os ensaios para avaliação do efeito acustoelástico foram realizados em um equipamento diferente do utilizado nos ensaios de caracterização. O cilindro utilizado para aplicação do carregamento no ensaio de acustoelasticidade tem diâmetro inferior ao utilizado para caracterização (Figura 7.3), o que causa uma alteração na distribuição do campo de tensões.

Figura 7.3 – Ensaios nos blocos: (a) caracterização e (b) acustoelasticidade

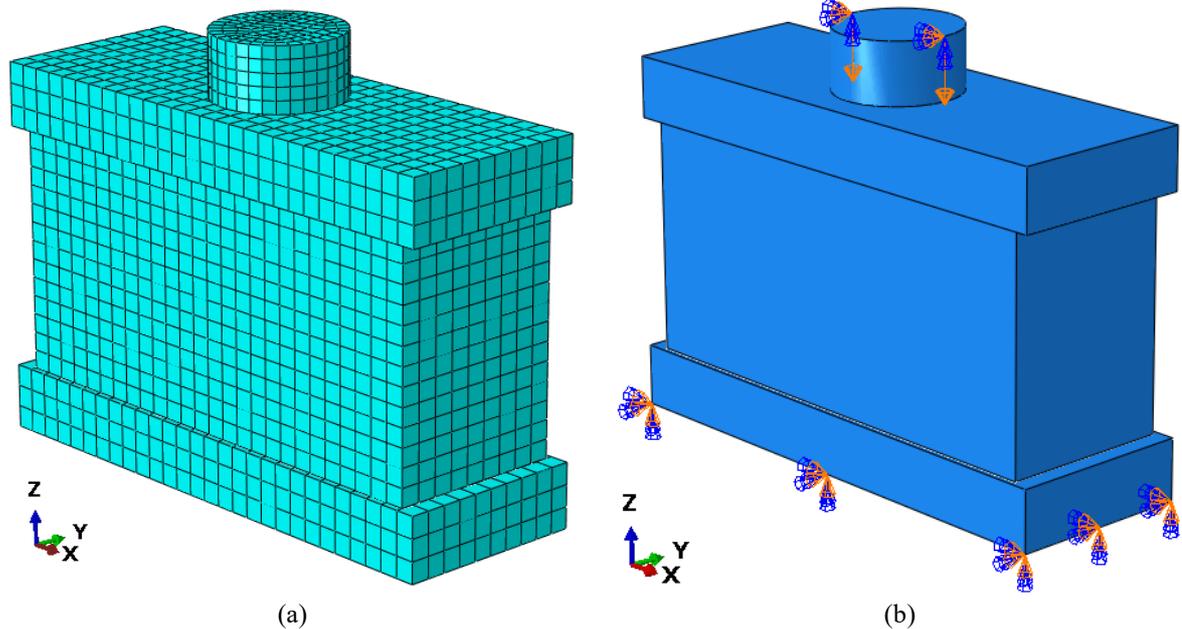


Fonte: da autora

Barbosa (2004) estudou o comportamento de blocos e primas submetidos à compressão por meio de simulações numéricas com o uso da ferramenta computacional ANSYS[®]. Neste estudo, o autor simulou também as chapas metálicas utilizadas em ensaio para distribuição do esforço. Uma vez que a chapa se deforma com a aplicação da tensão, o autor mostrou que a forma de aplicação do carregamento tem influência sobre a distribuição do campo de tensões.

Portanto, a partir do modelo validado da simulação tridimensional, um cilindro de aço (descrito com o mesmo modelo de material utilizado na placa metálica) foi adicionado sobre a placa superior (Figura 7.4). As condições de contorno e o carregamento aplicados anteriormente na face superior da placa foram transferidos para a face superior do cilindro. A interface entre placa e cilindro foi caracterizada com uma restrição do tipo *tie*, ou seja, não foi permitido nenhum deslocamento relativo entre as duas superfícies.

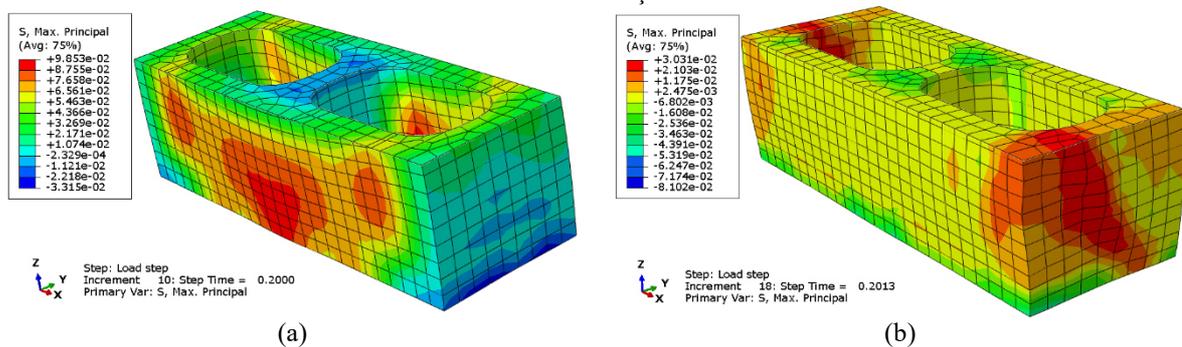
Figura 7.4 – Modelo de compressão do bloco no ensaio de acustoelasticidade: (a) malha adotada e (b) condições de contorno



Fonte: da autora

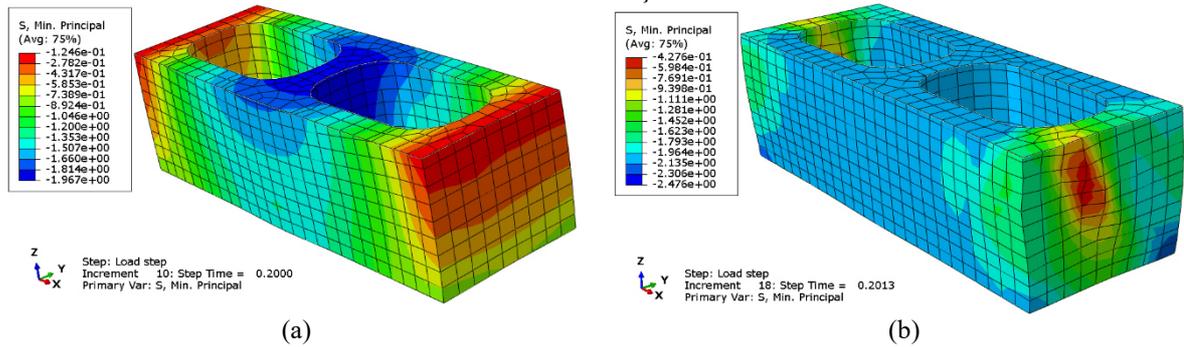
A Figura 7.5 e a Figura 7.6 mostram a distribuição das tensões principais máximas e mínimas, respectivamente, nos modelos numéricos do bloco comprimido. Os resultados se referem ao nível de tensão máximo aplicado durante os ensaios de ultrassom para verificação do efeito acustoelástico (tensão aplicada de 10 MPa e deformação de 0,75%). Os blocos foram cortados a meia altura para enfatizar a região do bloco por onde a onda se propaga durante o ensaio de VPU. A unidade de tensão na legenda é kN/cm^2 .

Figura 7.5 – Tensões máximas principais ($\epsilon = 0,075\%$) durante o ensaio: (a) de acustoelasticidade e (b) de caracterização



Fonte: da autora

Figura 7.6 – Tensões mínimas principais ($\varepsilon = 0,075\%$) durante o ensaio: (a) de acustoelasticidade e (b) de caracterização

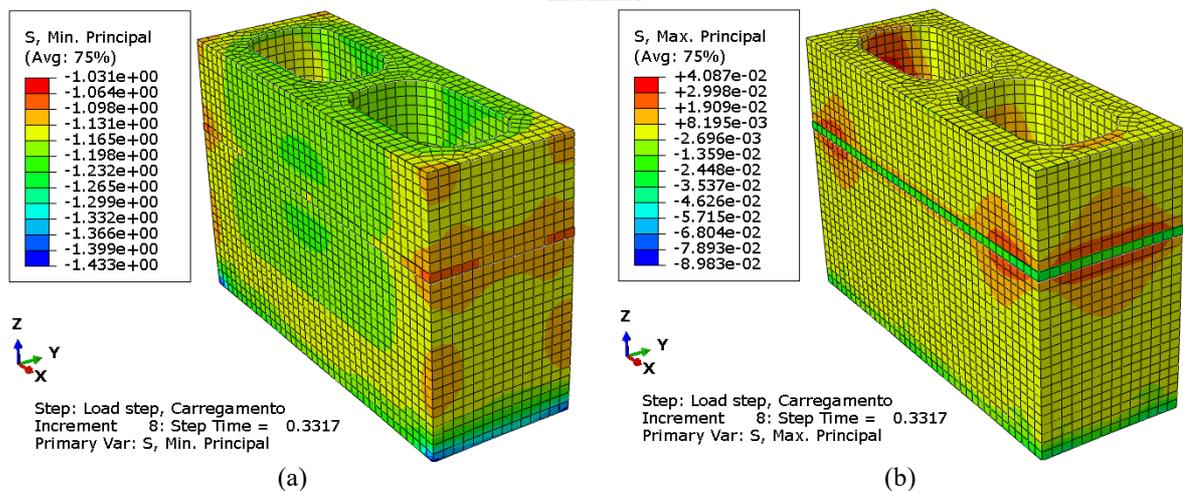


Fonte: da autora

Como pode ser observado nos resultados, a aplicação do deslocamento por meio de um cilindro menor faz com que as tensões mínimas e máximas tenham maior intensidade no centro do bloco. Além disso, as tensões de tração máximas também são maiores nessa simulação. Com a repetição dos ciclos de pré-carregamento, é esperado que a danificação na região central seja bem superior à observada nos septos externos. Neste sentido, se justifica que os resultados variem muito entre septo interno e externo, uma vez que o nível de tensão e de danificação desenvolvidos nas duas regiões do bloco são significativamente diferentes.

As tensões principais desenvolvidas em prismas de dois blocos submetidos a compressão uniaxial são mostradas na Figura 7.7. A partir da simulação, podemos perceber que as tensões de compressão são mais intensas no centro do bloco, embora a diferença entre os septos seja menos significativa nos prismas em comparação aos blocos.

Figura 7.7 - Tensões principais no modelo tridimensional do prisma de dois blocos ($\varepsilon=0.58\%$): (a) mínimas e (b) máximas

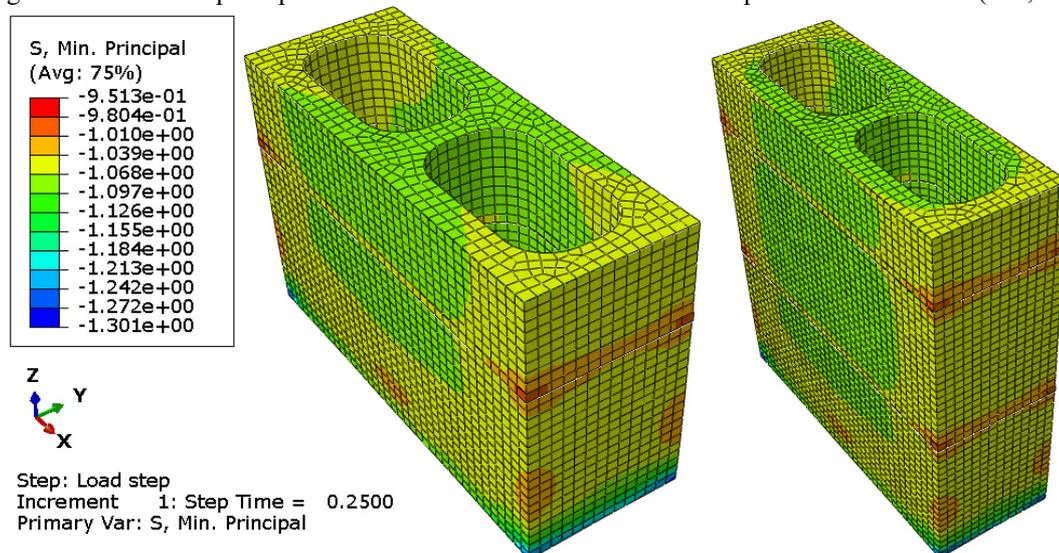


Fonte: da autora

Em ambos os blocos do prisma 1, foi possível perceber que o septo interno apresentou comportamento mais irregular que o interno, sendo que no bloco inferior não foi possível determinar a curva acustoelástica. Entretanto, nos ensaios dos outros prismas, onde a tensão aplicada foi menor, houve pouca variação no coeficiente acustoelástico entre os septos internos e externos dentro de um mesmo bloco.

As tensões principais mínimas desenvolvidas em prismas de três blocos (Figura 7.8) indicam que se esperava que os coeficientes acustoelásticos fossem similares entre os septos internos dos três blocos, assim como entre os septos internos dos três blocos.

Figura 7.8 – Tensões principais mínimas no modelo tridimensional do prisma de três blocos ($\epsilon=0,59\%$)



Fonte: da autora

A partir dos coeficientes acustoelásticos mostrados na Tabela 4.24, foram calculados as médias e os coeficientes de variação para cada prisma, considerando septos externos e internos (Tabela 7.1).

Tabela 7.1 – Coeficientes acustoelásticos nos prismas de três blocos por septo

Prisma	Septos internos		Septos externos	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)
Prisma 1	0,28	15,9%	0,20	32,8%
Prisma 2	0,20	5,0%	0,12	13,1%
Prisma 3	0,24	27,3%	0,22	52,4%
Total	0,24	22,4%	0,18	45,8%

Fonte: da autora

Dado que o bloco tem uma variabilidade intrínseca à estrutura, mesmo propriedades como a resistência à compressão e módulo de elasticidade apresentaram coeficientes de variação de 12,66% e 13,02%, respectivamente (Tabela 4.8). Nos prismas de três blocos, a variação entre os módulos de elasticidade foi de 18,52% (Tabela 4.14). É esperado que a variação do coeficiente acustoelástico seja superior à variação do módulo de elasticidade, uma vez que o coeficiente depende também das propriedades elásticas do material. Portanto, uma variação de cerca de 20%, como a encontrada para os coeficientes acustoelásticos medidos nos septos internos do prisma 3, pode estar próxima da precisão que podemos almejar para este parâmetro.

7.2 Comparações entre blocos, prismas e paredes

A fim de comparar os resultados obtidos em blocos, prismas e paredes sem preenchimento, a média e o coeficiente de variação dos coeficientes acustoelásticos são mostrados na Tabela 7.2, separados por tipo de estrutura e local em que as medidas foram realizadas.

Tabela 7.2 – Resumo dos coeficientes acustoelásticos em elementos sem preenchimento

Estrutura	Bloco	Septo interno		Septo externo	
		Média	CV (%)	Média	CV (%)
Bloco	-	0,11	68,2%	0,049	32,1%
Prisma de 2 blocos	Superior	0,12	67,6%	0,17	25,0%
	Inferior	0,12	58,9%	0,080	17,7%
Prisma de 3 blocos	Superior	0,24	19,1%	0,13	7,7%
	Intermediário	0,21	17,0%	0,16	31,5%
Pequenas paredes	Inferior	0,28	24,6%	0,25	44,5%
	4ª fiada	0,019	52,1%		
	3ª fiada	0,038	39,4%		
	2ª fiada	0,035	64,6%		

Fonte: da autora

De modo geral, os prismas de três blocos foram as estruturas que tiveram menores variações no coeficiente acustoelástico. Comparando blocos e prismas, podemos supor que a presença da argamassa tenha contribuído positivamente para a distribuição de tensões e para a regularização do efeito acustoelástico.

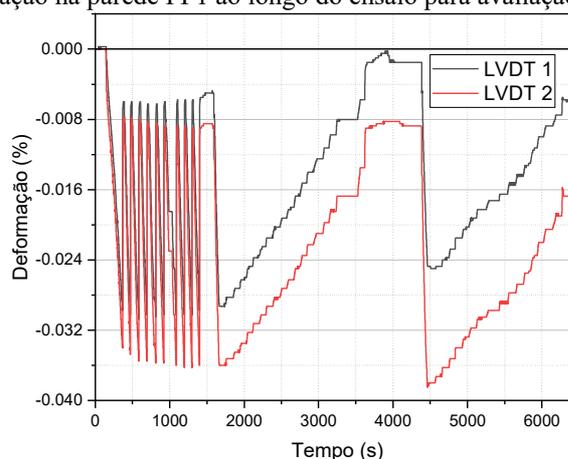
Nas paredes, a variação nos coeficientes foi bem superior à encontrada nos prismas e o valor dos coeficientes foram menores em uma ordem de grandeza. Uma possível justificativa para esses resultados consiste em pequenos desvios de prumo apresentados pelas paredes após o carregamento. A parede PP3, cujas fissuras foram mostradas na Figura 4.29, configurou um caso extremo em que a duração, o carregamento e os pontos de ensaio foram reduzidos para evitar o colapso da amostra, mas desvios menores também foram observados nas outras paredes.

A aplicação de compressão nas paredes implica em deformações verticais e, sendo a alvenaria heterogênea e composta por materiais com módulos de elasticidade diferentes, esta deformação é variável ao longo da parede. Nos ensaios para avaliação do efeito acustoelástico, foram aplicados vários ciclos de carregamento e, a cada ciclo, a parede era completamente descarregada. Logo, mesmo que a parede não estivesse fora de prumo a princípio, pequenas deformações diferenciais foram potencializadas com a repetição dos ciclos de carregamento. Neste sentido, é possível supor que a variação nos resultados e a diminuição dos coeficientes acustoelásticos estejam relacionados à introdução de tensões de tração devido a esforços de segunda ordem.

A fim de verificar se ocorreu flexão nas paredes, foram analisadas as deformações desenvolvidas na parede PP1 ao longo do ensaio. Conforme mostrado na Figura 3.23, as paredes foram instrumentadas com transdutores LVDT em lados opostos. A Figura 7.9 confirma o desenvolvimento de flexão na parede. Como pode ser observado, nos primeiros ciclos de pré-carregamento, as curvas de deformação são praticamente coincidentes nos dois transdutores, indicando que a parede estava alinhada verticalmente no início do ensaio, mas se afastam a cada vez que o carregamento é retirado. Nos últimos dois ciclos, quando são realizados os ensaios de ultrassom, as deformações mostradas pelos dois transdutores já são significativamente diferentes.

Zhang et al. (2012) demonstrou experimentalmente que cilindros de concreto de resistência normal (22 MPa) submetidos a tração direta apresentaram redução na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Portanto, a flexão das paredes e a consequente variação no nível de tensão ao longo da trajetória da onda contribuem para reduzir o valor do coeficiente acustoelástico.

Figura 7.9 – Deformação na parede PP1 ao longo do ensaio para avaliação da acustoelasticidade



Fonte: da autora

Por outro lado, sendo as tensões de segunda ordem influenciadas pelo desaprumo da parede, é esperado que haja uma maior variabilidade nas curvas acustoelásticas, já que a distribuição de tensão varia entre as paredes.

Uma possível solução para a avaliação dos coeficientes acustoelásticos em pequenas paredes seria não descarregar completamente a amostra entre os ciclos de carregamento. A manutenção de um carregamento baixo (inferior a 10 kN) funcionaria como travamento para diminuir a acomodação da parede e favorecer a manutenção do alinhamento vertical.

7.3 Análise da influência do preenchimento com graute

Conforme discutido ao longo do capítulo 4, as medidas de VPU na região do preenchimento são pouco favoráveis à avaliação do efeito acustoelástico. Nos elementos menores (blocos e prismas de dois blocos), todas as curvas apresentam variações positivas de velocidade e um comportamento similar ao observado em amostras de concreto. Nessas estruturas, o coeficiente acustoelástico teve a mesma ordem de grandeza observada nos septos de elementos sem preenchimento.

No entanto, conforme aumentou-se o tamanho da estrutura grauteada, as curvas acustoelásticas no graute passaram a tender para um comportamento de parábola côncava. Neste sentido, demonstrou-se que a região do preenchimento não é recomendável para a avaliação do efeito acustoelástico, uma vez que a variabilidade dos resultados é muito maior nesta região que nos septos dos blocos.

A Tabela 7.3 mostra a comparação dos coeficientes acustoelásticos obtidos nos septos dos elementos sem preenchimento e preenchidos com graute. De modo geral, observa-se que

os coeficientes acustoelásticos foram menores em elementos com preenchimento, indicando que o graute absorveu parte da tensão e, conseqüentemente, da variação de velocidade.

Tabela 7.3 – Resumo dos coeficientes acustoelásticos em elementos sem preenchimento e com preenchimento

Estrutura	Bloco	Elementos não preenchidos				Elementos preenchidos			
		Septo interno		Septo externo		Septo interno		Septo externo	
		Média	CV(%)	Média	CV(%)	Média	CV(%)	Média	CV(%)
Bloco	-	0,11	68,2%	0,049	32,1%	0,029	97,9%	0,027	64,0%
Prisma 2 blocos	Sup.	0,12	67,6%	0,17	25,0%	0,069	48,6%	0,059	23,9%
	Inf.	0,12	58,9%	0,080	17,7%	0,083	11,9%	0,057	18,9%
Prisma 3 blocos	Sup.	0,24	19,1%	0,13	7,7%	0,047	65,2%	0,024	156,4%
	Int.	0,21	17,0%	0,16	31,5%	0,022	69,9%	0,037	24,3%
	Inf.	0,28	24,6%	0,25	44,5%	0,064	63,1%	0,044	85,4%
Pequenas paredes	4^afiada	0,019	52,1%			0,010	81,5%		
	3^afiada	0,038	39,4%			0,014	43,6%		
	2^afiada	0,035	64,6%			0,012	29,3%		

Fonte: da autora

Nas medidas realizadas na região preenchida, foram observados coeficientes acustoelásticos superiores em uma ordem de grandeza em relação aos coeficientes medidos nos septos da região preenchida. Este resultado indica que é possível diferenciar regiões preenchidas e regiões de septo dos blocos em avaliações experimentais.

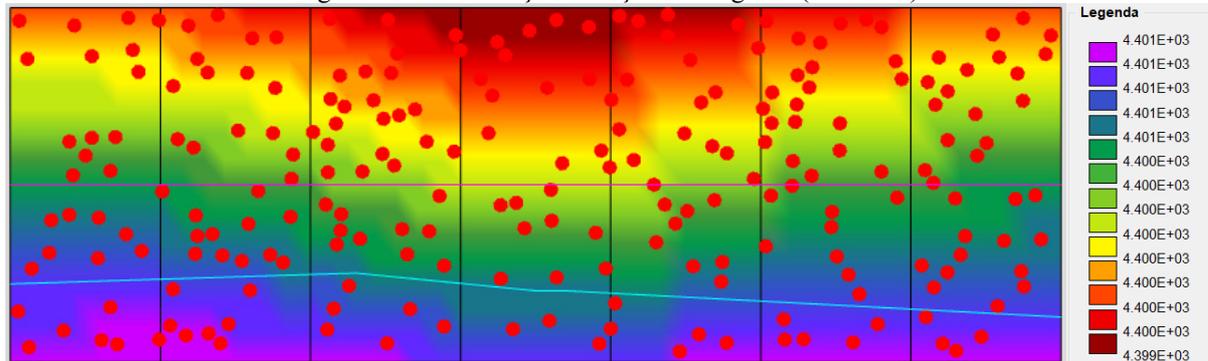
Por fim, a variação entre os coeficientes aumentou nos elementos preenchidos, mesmo considerando apenas as medidas realizadas nos septos. Novamente, destaca-se aqui que a distribuição de tensão entre bloco e graute é variável e depende da compatibilidade de deformação entre os materiais. Daí a dificuldade de obtenção de coeficientes acustoelásticos consistentes para elementos de alvenaria com preenchimento.

É necessário ressaltar que os ensaios de caracterização indicaram boa compatibilidade entre os comportamentos do bloco e do preenchimento, entretanto, estes ensaios foram realizados com o graute aos 28 dias. Devido à pandemia de COVID-19, as atividades presenciais no Laboratório de Estruturas foram interrompidas e, quando retomadas, os elementos preenchidos utilizados nos ensaios de ultrassom já tinham cerca de 1 ano de idade. Com isso, é esperado que as características do graute sejam diferentes das medidas durante o programa experimental.

7.4 Análise da variação de velocidade com a aplicação de tensão considerando seções heterogêneas

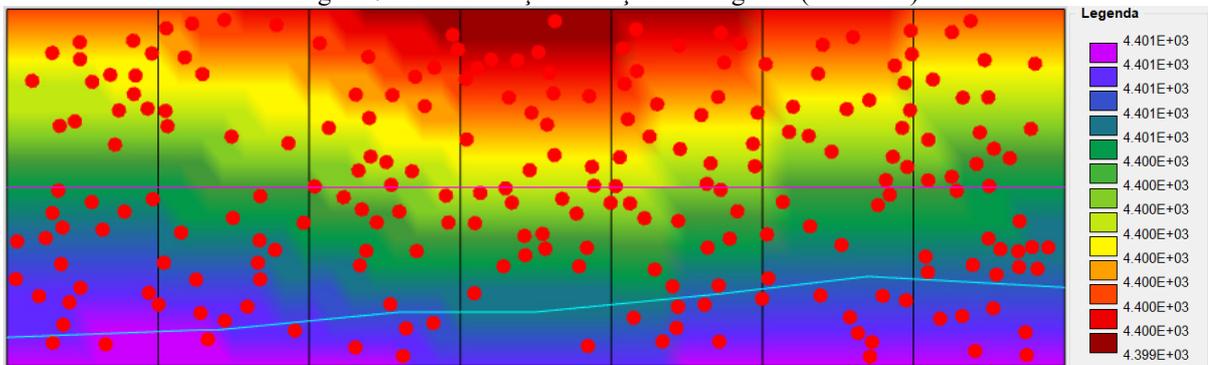
Esta sequência foi utilizada para simular quatro seções com distribuição aleatória de partículas. Na Figura 7.10 a Figura 7.13, as seções são mostradas com a distribuição de velocidades correspondente a uma tensão de compressão de 4,76 MPa, com suas respectivas partículas (representadas em vermelho), linhas de medição (linha horizontal em magenta no centro da seção) e trajetórias otimizadas (em azul).

Figura 7.10 – Simulação da seção heterogênea (modelo 1)



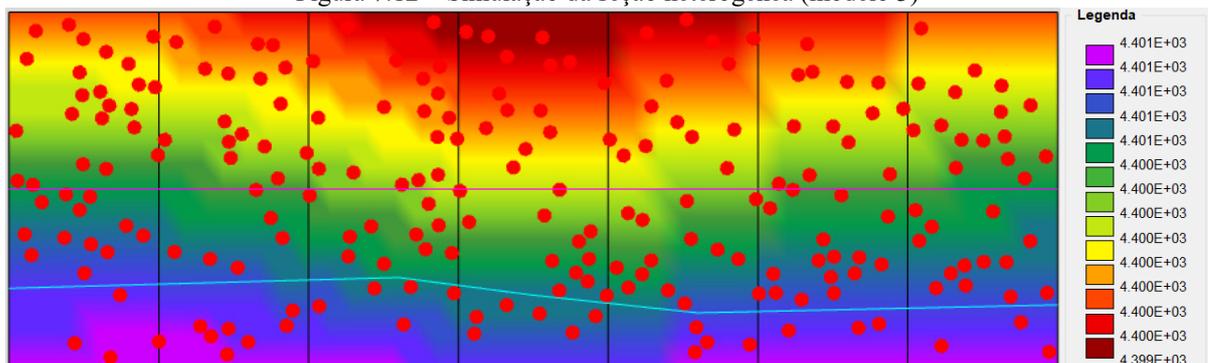
Fonte: da autora

Figura 7.11 – Simulação da seção heterogênea (modelo 2)



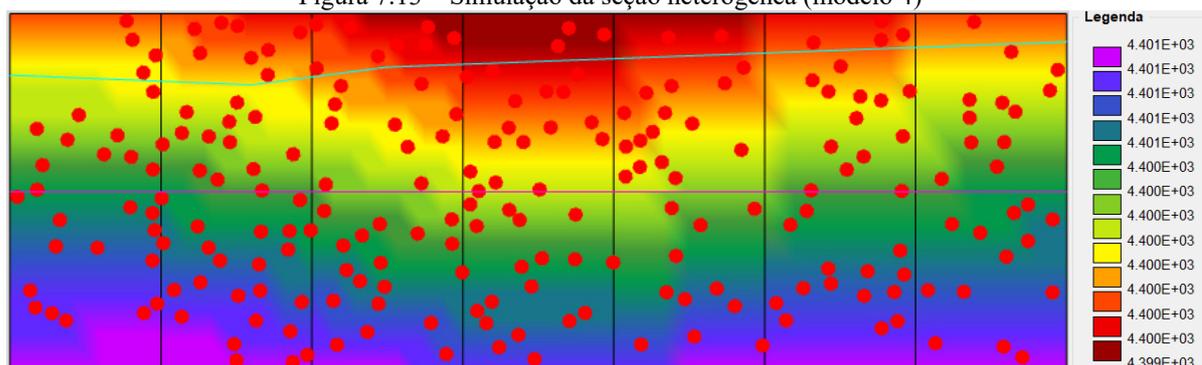
Fonte: da autora

Figura 7.12 – Simulação da seção heterogênea (modelo 3)



Fonte: da autora

Figura 7.13 – Simulação da seção heterogênea (modelo 4)



Fonte: da autora

Comparando as trajetórias otimizadas para as seções homogêneas e heterogêneas, observa-se o efeito dos vazios sobre a trajetória de propagação da onda ultrassônica. A velocidade de propagação da onda no ar é cerca de 10 vezes menor que no concreto. Com isso, a trajetória mais rápida se desvia dos vazios e apresenta trechos inclinados.

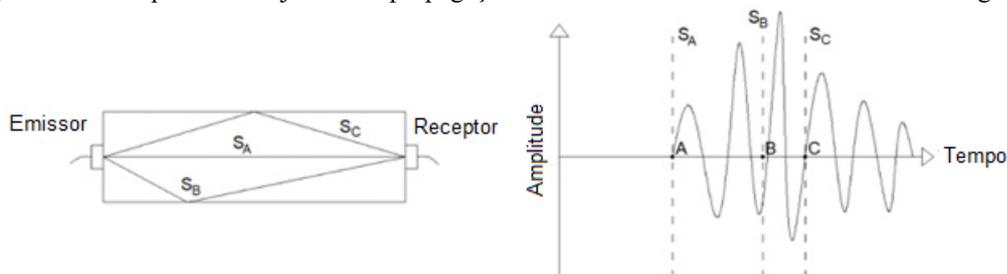
Enquanto observar a variação na direção da trajetória consiste em um dos objetivos desta simulação, a presença de trechos não horizontais constitui uma das limitações do modelo. As velocidades dos nós foram calculadas na direção horizontal a partir da tensão de compressão da direção vertical. Logo, quando a onda se propaga com uma inclinação diferente, a tensão atuando nesse sistema de coordenadas é diferente da tensão vertical, e, portanto, a variação de velocidade decorrente do efeito acustoelástico também é alterada.

Além da variação no estado de tensões do material devido à rotação do eixo de propagação, as propriedades elásticas do concreto também podem ser alteradas quando há variação na direção de medição. Haach et al. (2020) mostraram, por meio de ensaios de ultrassom e ressonância acústica, que prismas de concreto apresentam anisotropia mesmo na ausência de carregamento aplicado. Sombra (2020) realizou ensaios de ultrassom em blocos de alvenaria do mesmo lote utilizado nesta pesquisa e encontrou uma diferença de até 146 m/s na velocidade de propagação de ondas longitudinais em um mesmo bloco variando apenas a direção do ensaio.

Dada a variação na direção de propagação da onda e a anisotropia do concreto, a teoria da acustoelasticidade conforme descrita matematicamente por Hughes e Kelly (1953) pode não ser aplicável ao material mesmo para níveis baixos de carregamento. A presença de agregados, porosidade e fissuração promove desvios na trajetória de onda quando ela se propaga pelo concreto. O esquema mostrado na Figura 7.14 exemplifica três trajetórias possíveis em uma mesma emissão de pulso ultrassônico. Devido à heterogeneidade do material, partes da energia da onda se dispersam por trajetórias diferentes, em ângulos diferentes. Como as propriedades

elásticas do concreto variam com a direção, as ondas percorrem trajetórias com velocidades diferentes e o sinal recebido pelo transdutor é composto pela combinação dessas informações. Logo, não existe um coeficiente acustoelástico único ao longo do sinal.

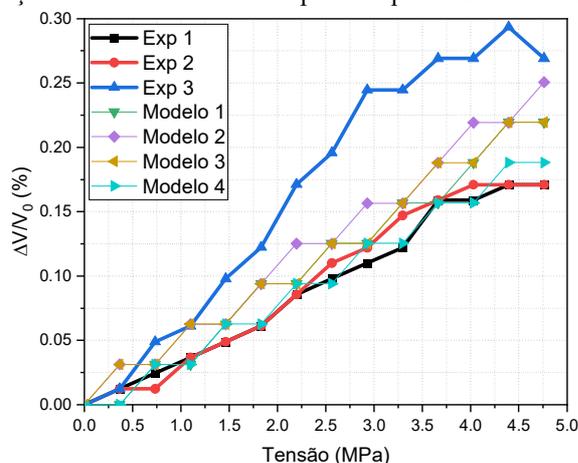
Figura 7.14 – Esquema da trajetória de propagação de ondas ultrassônicas em materiais heterogêneos



Fonte: da autora

As curvas acustoelásticas dos quatro modelos são mostradas na Figura 7.15. Três curvas experimentais são incluídas para comparação e destacadas com linhas mais espessas. Como pode ser observado, a distribuição aleatória das partículas já é suficiente para gerar variação na curva acustoelástica.

Figura 7.15 – Variação relativa de velocidade para os quatro modelos de seção heterogênea



Fonte: da autora

Em um ensaio real, a distribuição da velocidade de propagação na seção, que foi a mesma nas quatro simulações, é variável. Imperfeições no bloco podem levar a concentrações de tensão, pequenas variações no posicionamento do bloco na máquina de ensaio podem gerar carregamento excêntrico e o processo de fabricação do bloco, mesmo com o controle industrial, é propício a pequenas variações no módulo de elasticidade e velocidade de propagação do material. Este tipo de simulação simplificada exemplifica as limitações do método em obter uma curva ou um coeficiente acustoelástico único para o material.

7.5 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foram apresentadas algumas análises relacionando resultados experimentais e numéricos.

Na primeira parte do capítulo, mostrou-se comparação entre os resultados experimentais e os resultados esperados a partir do campo de tensões determinado durante a simulação numérica. Mostrou-se que a variação no equipamento de ensaio utilizado para caracterização e para aplicação de carregamento durante os ensaios ultrassônicos nos blocos favoreceu a concentração de tensão no septo central, explicando a grande diferença de comportamento entre os septos encontrada na avaliação experimental dos blocos.

Foi mostrado também que a distribuição de tensão simulada nos prismas foi praticamente uniforme ao longo da altura, tornando os coeficientes acustoelásticos mais uniformes nessas estruturas. Acredita-se que a camada de argamassa tenha favorecido a distribuição uniforme de esforços.

Nos ensaios em paredes, observou-se o desenvolvimento de esforços de flexão de segunda ordem, confirmados pela avaliação das deformações na parede PP1 ao longo do ensaio. Uma vez que a simulação numérica desenvolvida para a determinação do campo de tensões da parede representava apenas a compressão uniaxial, o estado de tensões desenvolvido durante o ensaio ultrassônico não correspondeu ao simulado.

Comparando os resultados obtidos em elementos preenchidos e não preenchidos, observou-se que, de modo geral, os coeficientes acustoelásticos foram menores nos elementos grauteados, indicando que o graute absorveu parte da tensão. No entanto, a variação no comportamento dos elementos preenchidos foi muito alta mesmo considerando apenas os septos dos elementos.

Por fim, foram apresentadas as análises da simulação do ensaio de VPU em uma seção heterogênea. A porosidade dos blocos foi simulada com a introdução de partículas com VPU iguais à velocidade de propagação de ondas sônicas no ar. Nesta etapa, foram simuladas quatro seções com distribuições aleatória de poros e com distribuição de tensões análogas ao septo externo do bloco. Observou-se que a porosidade alterou significativamente a trajetória das ondas nas seções e que esta trajetória deixou de ser puramente horizontal. Ou seja, devido à heterogeneidade do material, a direção de propagação da onda na amostra é variável, dificultando ainda mais a determinação de coeficientes acustoelásticos confiáveis, uma vez que estes são dependentes da direção de propagação.

8. Considerações finais

O presente trabalho apresentou um estudo sobre a investigação do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria estrutural formados por blocos de concreto. Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões geradas por este trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

8.1 Conclusões

No primeiro capítulo, foram descritos os objetivos gerais e específicos, assim como a motivação do trabalho e um pequeno resumo das etapas necessárias à sua realização. No segundo capítulo, apresentou-se uma revisão do estado da arte das pesquisas sobre o efeito da acustoelasticidade em materiais frágeis, a aplicação de ensaios não destrutivos em alvenaria e apresentou-se uma visão geral sobre os fundamentos do ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico. Nesta revisão, evidenciou-se a baixa quantidade de trabalhos que abordem o efeito acustoelástico em estruturas de alvenaria, especialmente considerando-se os materiais utilizados no Brasil.

Nos ensaios de caracterização, apresentou-se o comportamento físico dos blocos e o comportamento mecânico de todos os elementos de alvenaria estudados. Concluiu-se que os prismas e as paredes tiveram comportamento mecânico compatível com a literatura e que argamassa e o graute escolhidos apresentaram boa compatibilidade com os blocos de alvenaria.

Nos ensaios de VPU em blocos, houve uma grande variabilidade de resultados, provavelmente decorrente da danificação do material, que atingiu 75% de sua resistência característica. Os ensaios foram repetidos com um carregamento menor para possibilitar a obtenção de coeficientes acustoelásticos. A utilização de um cilindro de menor diâmetro para aplicação do carregamento nos blocos provocou uma concentração de tensão na sua região central, conforme apontado pela simulação numérica desenvolvida, que pode explicar a maior variabilidade de resultados nessa região.

Nos prismas, os gráficos obtidos com os prismas de três blocos mostraram menor variabilidade que os resultados de prismas de dois blocos. Esta diminuição da variabilidade com o aumento da complexidade da estrutura está relacionada ao menor estado de danificação das estruturas mais complexas. Nestes ensaios, o efeito acustoelástico foi medido em um septo externo e no septo interno de todos os blocos. Nos blocos, foram apenas dois pontos avaliados; no prisma de dois blocos, quatro pontos; e no prisma de três blocos, seis pontos. Nos prismas, observou-se danificação em pontos específicos, de modo que, mesmo que um dos septos

apresentasse um resultado discrepante, os outros pontos avaliados ainda gerariam curvas similares.

Os prismas apresentaram ainda comportamento aproximadamente linear na relação variação relativa de velocidade por tensão aplicada. Este resultado é relevante por permitir a obtenção de coeficientes acustoelásticos com coeficientes de determinação superiores a 90%. Por fim, ressalta-se a similaridade entre os coeficientes acustoelásticos obtidos com prismas de dois e três blocos.

Nos testes em pequenas paredes os coeficientes acustoelásticos obtidos foram quase 10 vezes menores que coeficientes os dos prismas. Observou-se que estas paredes desenvolveram esforços de segunda ordem, o que prejudicou a avaliação da acustoelasticidade nestes elementos, uma vez que o estado de tensões se tornou mais complexo do que o planejado inicialmente (compressão uniaxial).

De modo geral, a presença do graute aumentou a variação dos resultados nos elementos preenchidos, uma vez que o comportamento da estrutura fica menos previsível e a distribuição de tensões entre graute e bloco não é perfeita. Por fim, concluiu-se que, mesmo nos elementos preenchidos, é preferível que a avaliação do efeito acustoelástico ocorra na região dos septos dos blocos, e não na região dos vazios.

As simulações realizadas mostraram boa concordância com o comportamento mecânico experimental comparado até o pico da curva tensão-deformação. Considerou-se a validação neste trecho como suficiente para validar a modelagem uma vez que não se pretende atingir o pico de tensão dos elementos durante o programa experimental para a avaliação do efeito acustoelástico. Os modelos simulados também apresentaram boa concordância com o modo de ruptura dos blocos, apresentando desenvolvimento de tensões de tração nos septos laterais do prisma.

A partir do modelo numérico, foi possível perceber que a região central dos elementos desenvolve um campo de tensões uniforme, não perturbado pelas restrições do contorno, o que favorece a avaliação das tensões nesta região por meio da acustoelasticidade. Por outro lado, tensões de tração nos septos externos podem levar a fissuração e dificultar a realização do ensaio de VPU.

Além disso, foram apresentadas simulações bidimensionais da propagação de ondas mecânicas blocos de alvenaria avaliados por meio da ferramenta TUSom. Inicialmente, foram simuladas seções homogêneas com tensões análogas às desenvolvidas nos septos interno e externo do bloco de alvenaria analisado experimentalmente. Esta simulação evidenciou a dificuldade em obter um coeficiente acustoelástico de estruturas como blocos, que têm

distribuição de tensão não uniforme e, portanto, regiões com históricos de carregamento e estados de danificação diferentes.

Posteriormente, foram simuladas seções heterogêneas de concreto, com partículas representando os poros vazios. A porosidade teve impacto sobre a trajetória das ondas, tornando sua direção de propagação variável. Neste sentido, dificulta-se a reprodutibilidade do coeficiente acustoelástico, uma vez que seu valor depende da direção de propagação da onda.

Este trabalho demonstrou a possibilidade da avaliação do efeito acustoelástico em alvenaria, uma vez que a variação de velocidade com aplicação de tensão foi observada em todos os elementos estudados. No entanto, apesar da produção industrial do bloco, com controle de qualidade mais rigoroso que o concreto moldado in loco, a variação encontrada nos coeficientes acustoelásticos ainda foi alta.

Neste trabalho, foram analisadas apenas três amostras de cada tipo de elemento, portanto, é possível que um programa experimental em maior escala encontrasse coeficientes acustoelásticos mais consistentes. Como mostrado nos resultados em prismas de três blocos, foi possível obter coeficientes acustoelásticos em algumas regiões com coeficiente de variação inferior a 20%. Dada a variabilidade intrínseca ao material, esta variação parece razoável para o valor do coeficiente acustoelástico. Neste sentido, embora ainda existam muitas questões a serem esclarecidas sobre o efeito acustoelástico, principalmente com relação à influência do histórico de carregamento do material, é possível imaginar que, no futuro, a teoria da acustoelasticidade permita uma estimativa aproximada das tensões em alvenaria.

8.2 Sugestões para trabalhos futuros

A partir das discussões desenvolvidas neste trabalho, são sugeridos os seguintes estudos para trabalhos futuros:

- Investigação da influência do carregamento máximo aplicado sobre o efeito acustoelástico em blocos e prismas de alvenaria.
- Análise do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria utilizando o ensaio de ressonância.
- Investigação do efeito acustoelástico em elementos de alvenaria de material cerâmico.
- Desenvolvimento de modelos numéricos que representem a propagação de ondas mecânicas em materiais frágeis com danificação.

REFERÊNCIAS

ABBASI, Z.; OZEVIN, D. Acoustoelastic coefficients in thick steel plates under normal and shear stresses. **Experimental Mechanics**, v.56, p.1559-1575, 2016.

AGUIAR, O. P. **Estudo do comportamento de conectores Crestbond em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto**. 2015. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

AROSIO, D. et al. Nondestructive quality control of reinforced masonry buildings. **Journal of Infrastructure Systems**, v.18, p.34-46, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

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 15961-1**: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto parte 1: projeto. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961-2**: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto parte 2: execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

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 de obras. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

BARBOSA, C. S. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações com as propriedades mecânicas do material constituinte**. 2004. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

BIRTEL, V.; MARK, P. Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure. In: ABAQUS User's Conference, 2006, Boston, *Conference Proceedings...*, Providence: 2006. p. 95-108.

BLANCO, A. S. **Acoustoelastic effects of surface waves in concrete subjected to compressive and bending stresses**. 2015. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015.

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.

CARREIRA, J. D.; CHU, K. H. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. **ACI Journal**, v. 82-72, p. 797-804, 1985.

CARVALHO, P. R. O. **Análise numérica de pequenas paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto em situação de incêndio: ênfase no comportamento térmico e termoestrutural**. 2019. 313 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

DASSAULT SYSTÈMES. **Abaqus Analysis**. User's manual. 2015.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematik**, v. 1, p. 269-271, 1959.

EGLE, D. M.; BRAY, D. E. Measurements of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.60, p. 741-744, 1976.

ELDEVIK, S. **Measurement of non-linear acoustoelastic effect in steel using acoustic resonance**. 2014. 272p. Tese, University of Bergen, Bergen, 2014.

GIGLIO, V. M. **Aplicação de algoritmos bioinspirados na definição da trajetória ótima de pulsos ultrassônicos em elementos de concreto**. 2021. 157p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

GOKHALE, S. **Determination of applied stresses in rails using the acoustoelastic effect of ultrasonic waves**. 2007. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Texas A&M University, College Station, 2007.

GRAZZINI, A.; LACIDOGNA, G. Mechanical properties of historic masonry stones obtained by in situ non-destructive tests on the St. Agostino church in Amatrice (Italy). **Applied Sciences**, v. 11, 2021.

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, Vladimir Guilherme. **Propriedades dos materiais II**. 2018. 39 slides.

HAACH, V. G. et al. Evaluation of elastic anisotropic relations for plain concrete using ultrasound and impact acoustic tests. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.33, 2020.

HUANG, X.; BURNS, D.R.; TOKSOZ, M.N. The effect of stresses on the sound velocity in rocks: theory of acoustoelasticity and experimental measurements. **Earth Resources Laboratory Industry Consortia Technical Reports**, p.1-29, 2001

HUGHES, D.S.; KELLY, J.L. Second-order elastic deformation of solids. **Physical Review**, v.92, p.1145-1149, 1953.

HUSSAIN, A.; AKHTAR, S. Review of non-destructive tests for evaluation of historic masonry and concrete structures. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 42, p. 925-940, 2017.

ISIK, N.; HALIFEOGLU, F.M.; IPEK, S. Nondestructive testing techniques to evaluate structural damage of historical city walls. **Construction and Building Materials**, v. 253, 119228, 2020.

JASINSKI, R. Identification of stress states in compressed masonry walls using a non-destructive technique (NDT). **Materials**, v. 13, 2020.

JASINSKI, R.; STEBEL, K.; KIELAN, P. Use of the AE effect to determine the stresses state in AAC masonry walls under compression. **Materials**, v. 14, 2021.

KARIMPOULI, S.; TAHMASEBI, P.; SAENGER, E. H. Ultrasonic prediction of crack density using machine learning: a numerical investigation. **Geoscience Frontiers**, v. 13, 2022.

KOCAB, D; et al. Development of the elastic modulus of concrete under different curing conditions. **Procedia Engineering**, v. 195, p. 96-101, 2017.

KRAUTKRÄMER, J.; KRATKRÄMER, H. **Ultrasonic testing of materials**. 4 ed. Berlin: Springer-Verlag, 1990.

LILLAMAND, I. et al. Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading. **NDT&E International**, v. 43, p.655-660, 2010.

LOURENÇO, P. B. **Computational strategies for masonry structures**. 1996. 210p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Civil Engineering Department, Delft University of Technology, Delft, 1996a.

LUNDQVIST, P.; RYDÉN, N. Acoustoelastic effects on the resonance frequencies of prestressed concrete beams – Short-term measurements. **NDT&E International**, v.50, p.36-41, 2012.

MANNING, E.; RAMOS, L. F.; FERNANDES, F. M. Direct sonic and ultrasonic wave velocity under compressive stress. In: INTERNATIONAL MASONRY CONFERENCE, 9., 2014, Guimarães, *Atas...*, p. 1-12.

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.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MOHABUTH, M. et al. Effect of uniaxial stress on the propagation of higher-order Lamb wave modes. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v. 86, p. 104-111, 2016.

MOHAMAD, G. **Mecanismo de ruptura da alvenaria de blocos à compressão**. 2007. 290p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2007.

MOTAMEDI, S. et al. Prediction of ultrasonic pulse velocity for enhanced peat bricks using adaptive neuro-fuzzy technology. **Ultrasonics**, v. 61, p. 103-113, 2015.

MURNAGHAN, F. D. Finite deformations of an elastic solid. **American Journal of Mathematics**, v.59, p.235-260, 1937.

NAIK, T.R.; MALHOTRA, V.M.; POPOVICS, J.S. The ultrasonic pulse velocity method. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

NOGUEIRA, C. L.; RENS, K. L. Acoustoelastic response of concrete under uniaxial compression. **ACI Materials Journal**, v. 116, p. 21-33, 2019.

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 Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

ORTEGA et al. **Introdução à avaliação de tensões por ultrassom**. 1 ed. Rio de Janeiro: Virtual Científica, 2011.

POPOVICS, S.; POPOVICS, J. S. Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete. **Materials and Structures**, v. 24, p. 15-23, 1991.

RAMALHO, M.A.; CORRÊA, M.R.S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. 1 ed. São Paulo: PINI, 2003.

RAMÍREZ, F. C. **Deteção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

RAO, G. A. Generalization of Abrams' law for cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 495-502, 2001.

RESENDE, R.M.L.G. **Avaliação dos efeitos da danificação e da acustoelasticidade sobre a velocidade de pulso ultrassônico em corpos de prova submetidos a compressão uniaxial**. 2018. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

RODOVALHO, F. da S. **Simulação numérica de blocos e prismas de alvenaria em situação de incêndio**. 2018. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SAJID, S.H., et al. Strength estimation of concrete masonry units using stress-wave methods. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 518-528, 2018.

SALAZAR, A., et al. Data fusion of ultrasound and GPR signals for analysis of historic walls. **Materials Science and Engineering**, v. 42, 2012.

SANTOS, C. F. R., et al. Numerical and experimental evaluation of masonry prisms by finite element method. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, p. 477-508, 2017.

SCHIAVON, K.F.B. **Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de concreto**. 2015. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SOMBRA, T. N. **Aplicação do ensaio de ressonância acústica na caracterização mecânica de unidades de alvenaria estrutural**. 2020. 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SOUZA, J. R. N. **Estudo numérico e experimental da heterogeneidade do concreto por meio da variação da velocidade do pulso ultrassônico**. 2021. Qualificação (Mestrado em

Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

SHAHBENDER, R. A. Nondestructive measurements of tensile and compressive stresses. **PGUE**, p. 19-22, 1961.

SHOKOUHI, P.; ZOËGA, A., WIGGENHAUSER, H. Nondestructive investigation of stress-induced damage in concrete. **Advances in Civil Engineering**, p. 1-9, 2010.

SYKORA, M. et al. Assessment of compressive strength of historic masonry using non-destructive and destructive techniques. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 196-210, 2018.

YANG, Y. et al. Finite element prediction of acoustoelastic effect associated with Lamb wave propagation in pre-stressed plates. **Smart Materials and Structures**, 2019.

YURIKOV, A.; LEBEDEV, M.; PERVUKHINA, M. Ultrasonic measurements on thin samples: numerical modelling. In: GEOPHYSICAL CONFERENCE & EXHIBITION, 25., 2016, Adelaide, *ASEG Extended Abstracts*, p. 1-5.

ZHANG, W. et al. Detection of dynamic modulus and crack properties of asphalt pavement using a non-destructive ultrasonic wave method. **Applied Sciences**, 2019.

ZHANG, Y. et al. Study of stress-induced velocity variation in concrete under direct tensile force and monitoring of the damage level by using thermally-compensated Coda Wave Interferometry. **Ultrasonics**, v. 52, p. 1038-1045, 2012.

ZHONG, B.; ZHU, J.; MORCOUS, G. Measuring acoustoelastic coefficients for stress evaluation in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 309, 2021.

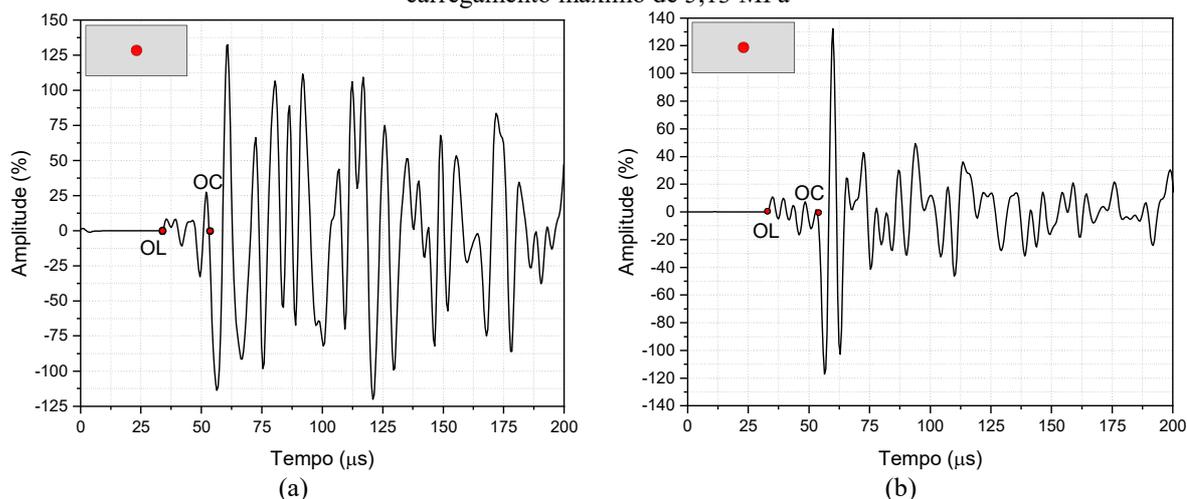
ZIELINSKA, M.; RUCKA, M. Non-destructive assessment of masonry pillars using ultrasonic tomography. **Materials**, v. 11, 2018.

APÊNDICE – SINAIS TÍPICOS DOS ENSAIOS DE ULTRASSOM EM ELEMENTOS DE ALVENARIA

Neste apêndice, são apresentados sinais típicos obtidos nos ensaios de ultrassom em elementos de alvenaria. Todos os sinais mostrados aqui foram obtidos nos elementos sem compressão aplicada e ao fim do ensaio, sendo, portanto, os sinais de referência para avaliação da variação relativa de velocidade. Será apresentado um sinal para tipo de elemento avaliado (blocos, prismas e paredes com e sem preenchimento). As regiões de chegada de ondas longitudinais “OL” e de cisalhamento “OC” serão destacadas com círculos vermelhos.

A Figura 1 mostra ondas típicas obtidas em blocos, com carregamento máximo aplicado de 9,89 MPa e 5,13 MPa.

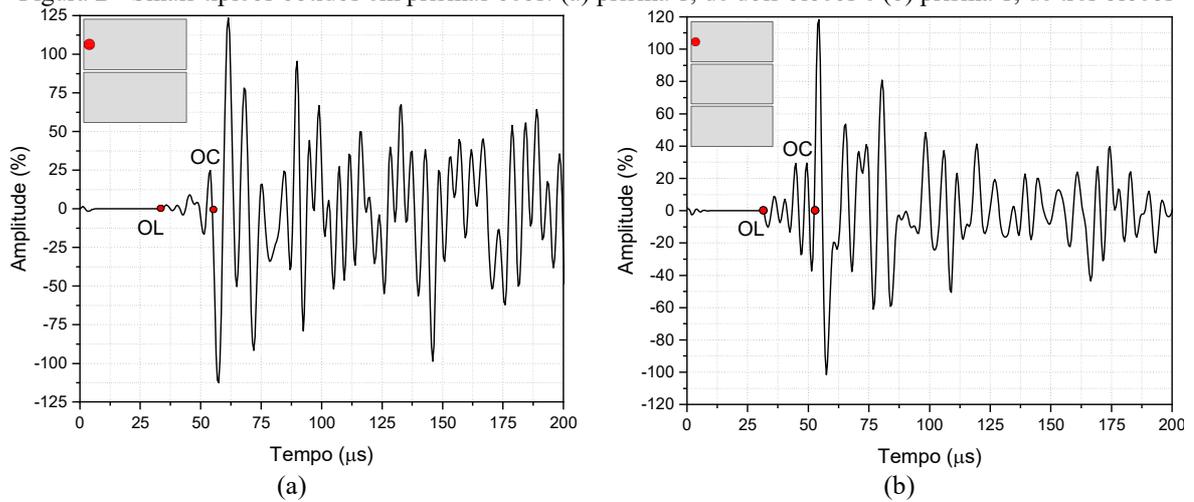
Figura 1 – Sinais típicos obtidos em blocos ociosos: (a) bloco 2, carregamento máximo de 9,89 MPa e (b) bloco 1, carregamento máximo de 5,13 MPa



Fonte: da autora

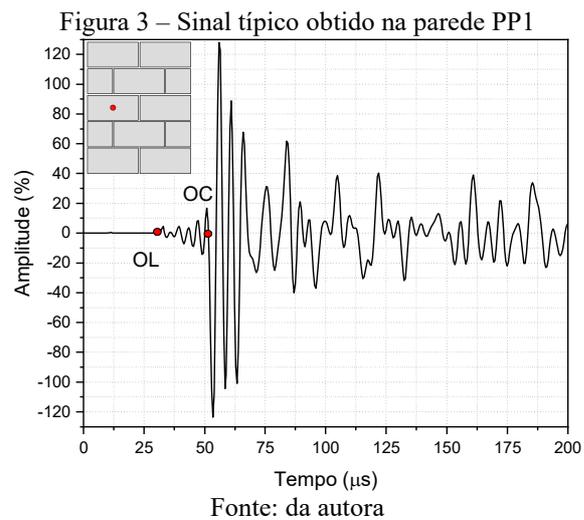
A Figura 2 mostra ondas típicas obtidas em prismas de dois e três blocos sem preenchimento.

Figura 2 - Sinais típicos obtidos em prismas ocós: (a) prisma 1, de dois blocos e (b) prisma 1, de três blocos

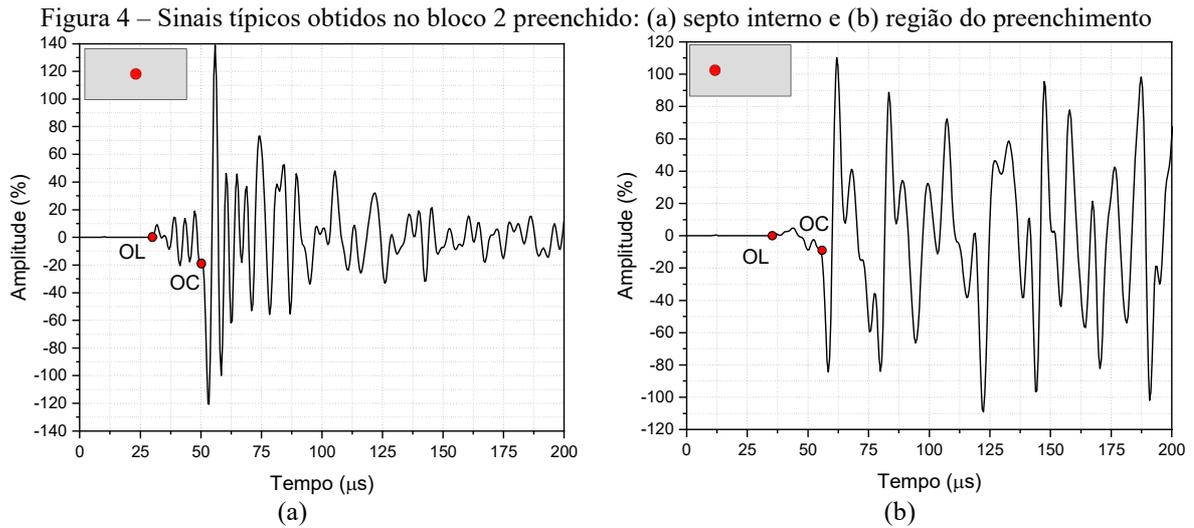


Fonte: da autora

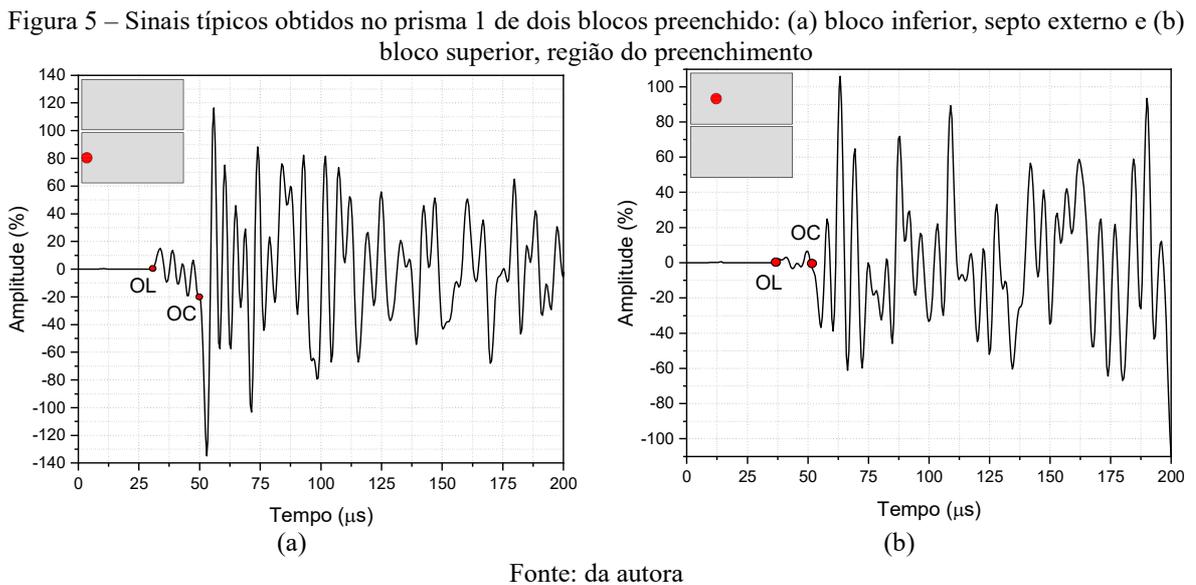
A Figura 3 mostra uma onda típica obtida na terceira fiada de uma parede sem preenchimento.



A Figura 4 mostra ondas típicas obtidas em um bloco preenchido na região do septo e na região do preenchimento. Nos elementos grauteados, optou-se por apresentar o sinal que tivesse a maior velocidade de onda longitudinal.

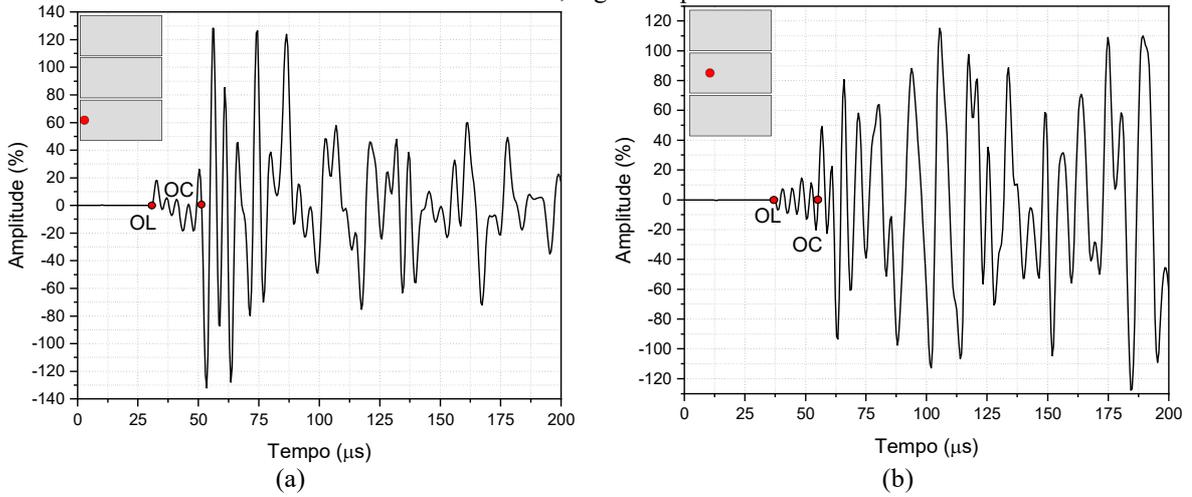


A Figura 5 mostra ondas obtidas em um prisma de dois blocos preenchido, na região do septo e do preenchimento.



A Figura 6 mostra ondas obtidas em um prisma de três blocos preenchido, na região do septo e do preenchimento.

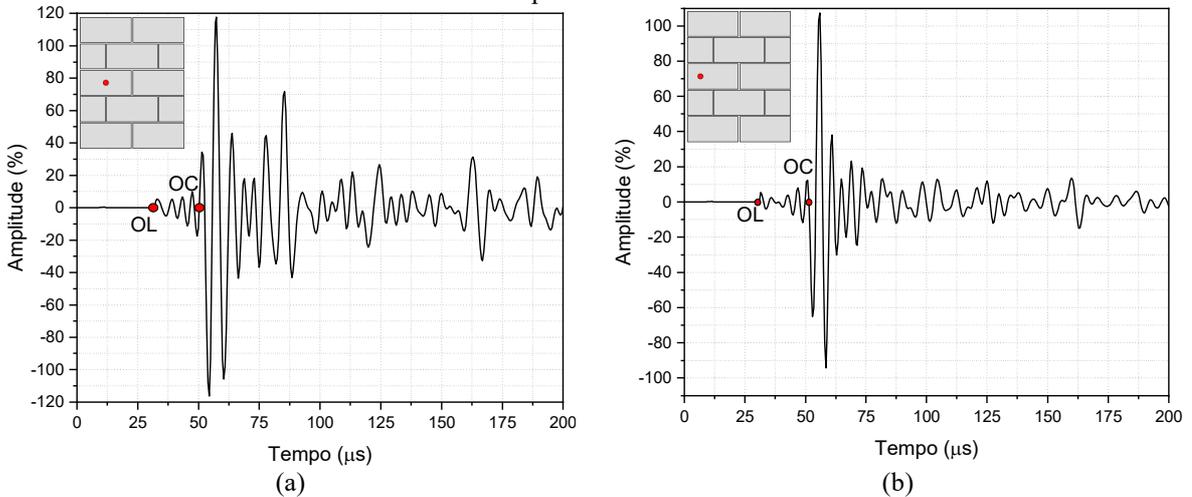
Figura 6 – Sinais típicos obtidos no prisma 3 de três blocos preenchido: (a) bloco inferior, septo externo e (b) bloco intermediário, região do preenchimento



Fonte: da autora

A Figura 7 mostra ondas obtidas em uma parede preenchida, na região do septo e do preenchimento.

Figura 7 – Sinais típicos obtidos na parede 1 preenchida, blocos de terceira fiada: (a) septo interno e (b) região do preenchimento



Fonte: da autora