

**ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL
DE ALVENARIA DE BLOCOS CERÂMICOS EXTRUDADOS, Prensados
E QUEIMADOS SOB AÇÕES ESTÁTICAS E DINÂMICAS**

ELIAS SOCRATES NASCIMENTO DA CRUZ JUNIOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
AGOSTO DE 2025

**ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL
DE ALVENARIA DE BLOCOS CERÂMICOS EXTRUDADOS, Prensados
E QUEIMADOS SOB AÇÕES ESTÁTICAS E DINÂMICAS**

ELIAS SOCRATES NASCIMENTO DA CRUZ JUNIOR

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”

Orientador: D.Sc. NIANDER AGUIAR CERQUEIRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
AGOSTO DE 2025

**ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL
DE ALVENARIA DE BLOCOS CERÂMICOS EXTRUDADOS, PENSADOS
E QUEIMADOS SOB AÇÕES ESTÁTICAS E DINÂMICAS**

ELIAS SOCRATES NASCIMENTO DA CRUZ JUNIOR

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”

Aprovada em 29 Agosto de 2025.

Comissão Examinadora:

D.Sc. Davi Fagundes Leal – IFF

D.Sc. Gustavo de Castro Xavier – UENF

D.Sc. Gustavo Henrique Nalon – UFJF

D.Sc. Niander Aguiar Cerqueira – UENF
Orientador

D.Sc. Vânia José Karam – UENF

Dedico esta vitória a Deus, aos meus pais, meu irmão e à minha noiva que sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte inesgotável de sabedoria, força e inspiração, agradeço profundamente por ter me sustentado em cada etapa desta jornada. Em meio aos desafios, incertezas e momentos de cansaço, foi a Tua presença que me deu direção, coragem e perseverança. Sem Tua graça, este trabalho não teria sido possível. Toda honra e glória a Ti.

Aos meus pais, pelo amor incondicional e pelo apoio constante em todos os momentos da minha vida. Obrigado por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidei, e por sempre estarem ao meu lado, oferecendo palavras de incentivo, orações e carinho. Ao meu irmão, pela amizade e companheirismo. A vocês, minha base e meu alicerce, minha eterna gratidão.

À cerâmica Artecerâmica Sardinha, pela valiosa doação de materiais, tornando possível a realização dos ensaios experimentais desta pesquisa. Aos meus companheiros de trabalho, em especial, aos alunos de Iniciação Científica e de Pós-Graduação agradeço sinceramente pela colaboração desta pesquisa.

Ao professor Niander, meu orientador, expresso minha mais profunda gratidão pela orientação firme, generosa e sempre atenta ao longo desta caminhada. Sua dedicação, paciência e vasto conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para meu crescimento acadêmico e pessoal.

À minha noiva, meu amor, minha parceira de vida, agradeço imensamente por todo o apoio, paciência e carinho durante essa jornada. Sua presença foi um alívio nos momentos de cansaço, um incentivo nos momentos de dúvida e uma alegria constante ao meu lado.

Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio da Chamada CNPq/MCTI Nº 10/2023 (Processo: 405948/2023-9); à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio concedido por meio de recurso para meu orientador (Bolsa JCNE - Processo: E-26/204.552/2024); e em especial ao apoio da UENF por meio do Programa de Apoio à Pesquisa Científica (PAPIC/UENF), Processo SEI-260002/006988/202.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS..... | ix |
| LISTA DE TABELAS | xii |
| LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS, SIGLAS E UNIDADES | xiii |
| RESUMO..... | xiv |
| CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 16 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 19 |
| 1.2.1 Objetivo geral..... | 19 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 19 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 20 |
| 1.4 ESCOPO DO TRABALHO | 21 |
| CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 22 |
| 2.1 REVISÃO DE LITERATURA COM APOIO BIBLIOMÉTRICO | 22 |
| 2.2 CERÂMICA VERMELHA..... | 27 |
| 2.3 BLOCOS CERÂMICOS | 28 |
| 2.3.1 Blocos cerâmicos de vedação..... | 28 |
| 2.3.3 Blocos cerâmicos extrudados, prensados e queimados | 32 |
| 2.4 ALVENARIA ESTRUTURAL | 33 |
| 2.4.1 Tipos de alvenaria estrutural | 33 |
| 2.4.2 Componentes da alvenaria estrutural..... | 34 |
| 2.5.3 Influência do bloco estrutural no modo de ruptura | 41 |
| 2.6 CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL NA ENGENHARIA CIVIL..... | 42 |
| 2.7 DINÂMICA DAS ESTRUTURAS | 47 |
| 2.7.1 Conceitos da dinâmica..... | 49 |
| 2.7.2 Cargas dinâmicas | 50 |
| 2.7.2.2 Estudos de cargas dinâmicas em alvenaria estrutural | 51 |
| 2.8 MODELAGEM NUMÉRICA | 55 |
| 2.8.1 Modelagem numérica em alvenaria estrutural | 56 |
| 2.8.2 Estudos utilizando análise numérica | 58 |
| CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS | 64 |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS | 64 |

| | |
|---|-----|
| 3.1.1 Propriedades geométricas | 64 |
| 3.1.2 Propriedades físicas | 65 |
| 3.1.3 Propriedades mecânicas | 68 |
| 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PRISMAS | 71 |
| 3.2.1 Resistência à Compressão dos Prismas | 71 |
| 3.2.2 Fator de Eficiência | 73 |
| 3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PEQUENAS PAREDES..... | 75 |
| 3.3.1 Resistência característica à compressão de pequenas paredes | 75 |
| 3.3.2 Fator de Eficiência (η_{pp})..... | 76 |
| 3.3.3 Correlação de Imagem Digital em Pequenas Paredes..... | 77 |
| 3.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO | 79 |
| 3.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA | 80 |
| 3.5.1 Análise Estática | 81 |
| 3.5.2 Análise Dinâmica | 84 |
| CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 87 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS | 87 |
| 4.1.1 Análise Dimensional | 88 |
| 4.1.2 Índice de Absorção de Água..... | 88 |
| 4.1.5 Módulo de Elasticidade dos Blocos..... | 90 |
| 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PRISMAS | 90 |
| 4.2.1 Resistência à Compressão de Prismas | 90 |
| 4.2.2 Módulo de Elasticidade dos Prismas..... | 91 |
| 4.2.3 Fator de Eficiência dos Prismas..... | 91 |
| 4.2.4 Correlação de Imagem Digital em Prismas | 92 |
| 4.2.5 Modo de Ruptura dos Prismas | 103 |
| 4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PEQUENAS PAREDES..... | 104 |
| 4.3.1 Resistência à Compressão das Pequenas Paredes | 104 |
| 4.3.2 Módulo de Elasticidade das Pequenas Paredes | 105 |
| 4.3.4 Correlação de Imagem Digital em Pequenas Paredes..... | 107 |
| 4.3.5 Modo de Ruptura das Pequenas Paredes | 114 |
| 4.4 MODELAGEM NUMÉRICA | 116 |
| 4.4.2 Modelagem Numérica da Pequena Parede..... | 118 |
| CAPÍTULO V – CONCLUSÕES | 128 |

| | |
|--|------------|
| 5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS | 129 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 130 |
| APÊNDICE | 136 |
| APÊNDICE 1 – BLOCOS CERÂMICOS..... | 136 |
| 1.1 Tamanha do Lote | 136 |
| 1.2 Análise Dimensional dos Blocos | 136 |
| 1.3 Absorção de Água dos Blocos | 137 |
| 1.4 Massa Específica Aparente..... | 137 |
| 1.5 Resistência à Compressão dos Blocos..... | 137 |
| APÊNDICE 2 – PRISMAS | 138 |
| 2.1 Resistência à Compressão de Prismas | 138 |
| 2.2 Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson..... | 138 |
| 2.3 Taxa de Deformação dos Prismas | 139 |
| APÊNDICE 3 - Pequenas Paredes..... | 141 |
| 3.1 Deformação das Pequenas Paredes | 141 |
| 3.2 Ruptura das Pequenas Paredes | 142 |
| APÊNDICE 4 – MODELAGEM NUMÉRICA..... | 143 |
| 4.2 Fissuras Internas na Estrutura | 144 |
| 4.3 Gráfico de Frequências Naturais..... | 145 |
| 4.4 Deslocamentos RMS em (mm) | 145 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Edifício Monadnock..... | 16 |
| Figura 2 - BCEPQ após extrusão, prensagem e queima. | 18 |
| Figura 3 - Fluxograma das etapas de uma revisão bibliográfica sistemática. .. | 23 |
| Figura 4 - Documentos por ano..... | 24 |
| Figura 5 - Documentos por países. | 25 |
| Figura 6 - Autores recorrentes..... | 26 |
| Figura 7 - Autores mais citados. | 27 |
| Figura 8 - Blocos cerâmicos de vedação. | 29 |
| Figura 9 - Blocos cerâmicos estruturais, (a) furo retangular e (b) furo circular. 30 | |
| Figura 10 - Fluxograma do processo de fabricação de blocos cerâmicos..... | 32 |
| Figura 11 - Modelos de Prismas..... | 35 |
| Figura 12 - Modelo de pequena parede. | 37 |
| Figura 13 - (a) junta de argamassa comprimida triaxialmente; (b) bloco comprimido e tracionado biaxialmente..... | 39 |
| Figura 14 - (a) prisma submetido a compressão axial; (b) ruptura por tração no bloco; (c) ruptura por esmagamento do bloco e (d) ruptura por esmagamento da junta de argamassa..... | 41 |
| Figura 15 - Carregamento determinístico periódico. | 48 |
| Figura 16 - Carregamento determinístico não-periódico. | 49 |
| Figura 17 - Forma simplificada dos modos de vibração..... | 51 |
| Figura 18 - Pontos de aplicação de cargas e sua frequência..... | 55 |
| Figura 19 - Exemplo dos componentes da alvenaria. | 57 |
| Figura 20 - Estratégias de modelagem, (a) micromodelagem detalhada, (b) micromodelagem simplificada e (c) macromodelagem..... | 58 |
| Figura 21 - Deslocamento e deformação em Y. | 59 |
| Figura 22 - Tensões..... | 60 |
| Figura 23 - Modelo de parede em alvenaria..... | 63 |
| Figura 24 - Dimensões do BCEPQ..... | 65 |
| Figura 25 - Procedimentos do ensaio de absorção d'água. | 66 |
| Figura 26 - Procedimentos do ensaio de absorção d'água inicial. | 67 |
| Figura 27 - Prensa Shimadzu, 500kN. | 68 |
| Figura 28 - Área líquida e Área bruta de um bloco estrutural..... | 70 |
| Figura 29 - Blocos capeados..... | 71 |
| Figura 30 - Prisma..... | 72 |
| Figura 31 - Modelo da utilização da técnica DIC..... | 75 |
| Figura 32 - (a) Prisma finalizado para ensaio; (b) Posicionamento das câmeras..... | 75 |
| Figura 33 – (a) pequena parede, (b) nível de mão..... | 76 |
| Figura 34 - Pequena Parede sendo preparada para o DIC..... | 77 |
| Figura 35 – Posicionamento da câmera para realização da DIC. | 78 |
| Figura 36 – Aba de análise estática estrutural..... | 81 |
| Figura 37 - Escolha do material..... | 82 |
| Figura 38 - Biblioteca de Materiais..... | 82 |
| Figura 39 - Geometria da estrutura..... | 83 |

| | |
|---|-----|
| Figura 40 - (a) Modelo, (b) configurações das características de análise. | 84 |
| Figura 41 - Abas de opções da modelagem dinâmica..... | 85 |
| Figura 42 – Etapas de simulação da análise dinâmica. | 85 |
| Figura 43 - Etiquetas de desvio..... | 92 |
| Figura 44 - Etiquetas de desvio, separação por cores. | 93 |
| Figura 45 - Prisma 1..... | 94 |
| Figura 46 - Prisma 2..... | 94 |
| Figura 47 - Prisma 3..... | 94 |
| Figura 48 - Prisma 4..... | 95 |
| Figura 49 - Prisma 5..... | 95 |
| Figura 50 - Prisma 6..... | 95 |
| Figura 51 - Gráfico comparativo dos prismas..... | 96 |
| Figura 52 - Gráfico Equivalente de deformação de von Mises (y) vs Tempo (x): (Prisma 1). | 97 |
| Figura 53 - Gráfico Equivalente de deformação de von Mises (y) vs Tempo (x): (Prisma 2). | 98 |
| Figura 54 - Gráfico Equivalente de deformação de von Mises (y) vs Tempo (x): (Prisma 3). | 98 |
| Figura 55 - Gráfico Equivalente de deformação de von Mises (y) vs Tempo (x): (Prisma 4). | 98 |
| Figura 56 - Gráfico Equivalente de deformação de von Mises (y) vs Tempo (x): (Prisma 5). | 99 |
| Figura 57 - Gráfico Equivalente de deformação de von Mises (y) vs Tempo (x): (Prisma 6). | 99 |
| Figura 58 - Gráfico de tempo(s) vs deformação(%): (Prisma 1). | 101 |
| Figura 59 - Gráfico de tempo(s) vs deformação(%): (Prisma 2). | 101 |
| Figura 60 - Gráfico de tempo(s) vs deformação(%): (Prisma 3). | 102 |
| Figura 61 - Gráfico de tempo(s) vs deformação(%): (Prisma 4). | 102 |
| Figura 62 - Gráfico de tempo(s) vs deformação(%): (Prisma 5). | 102 |
| Figura 63 - Gráfico de tempo(s) vs deformação(%): (Prisma 6). | 103 |
| Figura 64 - Ruptura dos Prismas: (a) trinca vertical; (b) destacamento frontal; (c) destacamento lateral. | 104 |
| Figura 65 - Etiquetas de desvio..... | 107 |
| Figura 66 - Gráfico Tensão-Deformação (Mini Parede 1). | 108 |
| Figura 67 - Gráfico Tensão-Deformação (Mini Parede 2). | 108 |
| Figura 68 - Gráfico Tensão-Deformação (Mini Parede 3). | 108 |
| Figura 69 - Deslocamento em (x): Mini Parede 1. | 110 |
| Figura 70 - Deslocamento em (y): Mini Parede 1. | 110 |
| Figura 71 - Deslocamento em (x): Mini Parede 2. | 110 |
| Figura 72 - Deslocamento em (y): Mini Parede 2. | 111 |
| Figura 73 - Deslocamento em (x): Mini Parede 3. | 111 |
| Figura 74 - Deslocamento em (y): Mini Parede 3. | 111 |
| Figura 75 - Gráfico de redução de espessura (pequena parede 1). | 113 |
| Figura 76 - Gráfico de redução de espessura (pequena parede 2). | 113 |
| Figura 77 - Gráfico de redução de espessura (pequena parede 3). | 114 |
| Figura 78 - Ruptura da Pequena Parede. | 115 |
| Figura 79 - Blocos e meio blocos modelados..... | 118 |

| | |
|---|-----|
| Figura 80 - Pequena Parede. | 118 |
| Figura 81 - Disposição das malhas. | 119 |
| Figura 82 - (a) Deformação com carga baixa (500N); (b) Deformação com carga alta (50kN) | 120 |
| Figura 83 - Tensão da estrutura após carregamento estático. | 120 |
| Figura 84 - Gráfico comparativo entre ruptura experimental e numérica. | 122 |
| Figura 85 - Deformações no modo 1. | 124 |
| Figura 86 - Deformações no modo 2. | 124 |
| Figura 87 - Deformações no modo 3. | 125 |
| Figura 88 - (a) modo 4, (b) modo 5 e (c) modo 6. | 125 |
| Figura 89 - Deslocamentos RMS. | 126 |
| Figura 90 - Mapa de tensão RMS. | 127 |
| Figura 91 - Tempo(s) vs Velocidade de deformação(1/s): (Prisma 1). | 139 |
| Figura 92 - Tempo(s) vs Velocidade de deformação(1/s): (Prisma 2). | 139 |
| Figura 93 - Tempo(s) vs Velocidade de deformação(1/s): (Prisma 3). | 139 |
| Figura 94 - Tempo(s) vs Velocidade de deformação(1/s): (Prisma 4). | 140 |
| Figura 95 - Tempo(s) vs Velocidade de deformação(1/s): (Prisma 5). | 140 |
| Figura 96 - Tempo(s) vs Velocidade de deformação(1/s): (Prisma 6). | 140 |
| Figura 97 - Gráfico de deformação da pequena parede 1. | 141 |
| Figura 98 - Gráfico de deformação da pequena parede 2. | 141 |
| Figura 99 - Gráfico de deformação da pequena parede 3. | 142 |
| Figura 100 - Diferentes regiões de ruptura das Paredes. | 142 |
| Figura 101 - Meio bloco (SpaceClaim). | 143 |
| Figura 102 - Parede estrutural (SpaceClaim). | 143 |
| Figura 103 - Bloco Estrutural (SpaceClaim). | 143 |
| Figura 104 - SpaceClaim. | 144 |
| Figura 105 - Regiões de Fissuras. | 144 |
| Figura 106 - Regiões de Fissuras. (Preto e Branco). | 144 |
| Figura 107 - Gráfico: Modo vs Frequências Naturais. | 145 |
| Figura 108 - Relatório Ansys / Adaptado. | 146 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Resultados de pesquisa. | 24 |
| Tabela 2 - Normas sobre blocos cerâmicos..... | 28 |
| Tabela 3 - Tolerâncias dimensionais para blocos estruturais..... | 31 |
| Tabela 4 - Comparativo de propriedades dos blocos. | 42 |
| Tabela 5 - Instrumentação utilizada para a técnica DIC. | 74 |
| Tabela 6 - Características geométricas dos blocos. | 88 |
| Tabela 7 - Resultados do ensaio de Absorção de Água. | 88 |
| Tabela 8 - Área Bruta e Líquida dos Blocos Cerâmicos. | 89 |
| Tabela 9 - Resistência dos Blocos Cerâmicos..... | 89 |
| Tabela 10 - Resistência dos Prismas. | 90 |
| Tabela 11 - Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson. | 91 |
| Tabela 12 - Fator de Eficiência (prisma/bloco). | 91 |
| Tabela 13 - Resistência à Compressão de Pequenas Paredes..... | 105 |
| Tabela 14 - Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson. | 105 |
| Tabela 15 - Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson, utilizando a DIC. | 106 |
| Tabela 16 - Fator de Eficiência (pequena parede/bloco). | 106 |
| Tabela 17 - Propriedades Mecânicas. | 117 |
| Tabela 18 - Comparativo entre tensão de ruptura experimental e numérica.... | 122 |
| Tabela 19 - Frequências naturais. | 123 |
| Tabela 20 - Tamanho do lote. | 136 |
| Tabela 21 - Análise Dimensional. | 136 |
| Tabela 22 - Índice de Absorção de Água NBR 15270-2 (ABNT,2023)..... | 137 |
| Tabela 23 - Massa Específica Aparente dos Blocos NBR 15270-2 (ABNT, 2023). | 137 |
| Tabela 24 - Resultados dos Ensaio de Resistência à Compressão dos Blocos - NBR15270-2 (ABNT, 2023)..... | 137 |
| Tabela 25 - Resultados dos Ensaio de Resistência à Compressão de Prismas - NBR15270-2 (ABNT, 2023). | 138 |
| Tabela 26 - Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson de Prismas. ... | 138 |
| Tabela 27 - Deslocamentos RMS. | 145 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS, SIGLAS E UNIDADES

| | |
|------------|---|
| AA | Absorção de Água |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANSYS | ANSYS Inc. (Software) |
| DIC | Correlação de Imagem Digital |
| UENF | Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro |
| LECIV | Laboratório de Engenharia Civil |
| LAMAV | Laboratório de Materiais Avançados |
| BCEPQ | Bloco cerâmico extrudado prensado e queimado |
| NBR | Norma Brasileira |
| ANICER | Associação Nacional da Indústria Cerâmica |
| ABC | Associação Brasileira de Cerâmica |
| FEM | Método dos Elementos Finitos |
| RMS | Valor Quadrático Médio |
| t | Período |
| f | Frequência |
| f_n | Frequência natural |
| Hz | Hertz (unidade de frequência) |
| RC | Resistência a Compressão |
| AA | Absorção de Água |
| f_{ck} | Resistência característica à compressão |
| E | Módulo de Elasticidade (Young) |
| ν (nu) | Coefficiente de Poisson |
| cm | Centímetro |
| mm | Milímetro |
| MPa | Megapascal |
| MEA | Massa Específica Aparente |
| σ | Tensão normal |
| ϵ | Deformação específica |

RESUMO

O presente estudo, de caráter experimental e numérico, investigou o comportamento estrutural de prismas e pequenas paredes construídas com Blocos Cerâmicos Extrudados, Prensados e Queimados (BCEPQ), os quais se configuram como alternativa tecnológica promissora. Apesar dos potenciais benefícios, suas propriedades mecânicas ainda carecem de investigações, sobretudo quanto à resposta frente a cargas estáticas e dinâmicas. O objetivo foi analisar o comportamento estrutural de blocos, prismas e pequenas paredes, com ênfase na resistência à compressão e nos modos de ruptura, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas construtivos com esse material. A motivação decorre da necessidade de soluções mais eficientes e da escassez de dados sobre o desempenho desses elementos estruturais. Os ensaios indicaram que os blocos apresentaram resistência característica à compressão de 4,86 MPa (área bruta), atendendo à NBR 15270-1 (ABNT, 2023), embora a absorção de água (22,83%) tenha excedido o limite normativo. Os prismas e pequenas paredes obtiveram resistências médias de 1,66 MPa e 0,98 MPa, monitoradas por Correlação Digital de Imagens (DIC). Também foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional no ANSYS 2025 R2, considerando propriedades físicas e geométricas reais. Os resultados mostraram que as pequenas paredes apresentaram capacidade resistente significativamente inferior à dos blocos e prismas, devido à maior esbeltez e às descontinuidades de encaixe. Embora o modelo numérico tenha reproduzido tendências gerais, a discrepância de aproximadamente 20% em relação aos valores experimentais impediu sua validação, sendo utilizado apenas com caráter exploratório. Ainda assim, forneceu diretrizes iniciais relevantes para futuros estudos e aprimoramentos de modelos computacionais aplicados a elementos estruturais de BCEPQ.

Palavras-chave: BCEPQ, Análise Experimental, Cargas Estáticas, Cargas Dinâmicas, Modelagem Numérica.

ABSTRACT

The present study, of both experimental and numerical nature, investigated the structural behavior of prisms and small walls constructed with Extruded, Pressed, and Fired Ceramic Blocks (BCEPQ), which represent a promising technological alternative. Despite their potential advantages, the mechanical properties and structural performance of these blocks remain insufficiently explored, particularly regarding their response to static and dynamic loading. The aim of this work was to analyze the structural behavior of blocks, prisms, and small walls, with emphasis on compressive strength and failure modes, contributing to the advancement of construction systems employing this material. The motivation arises from the need for more efficient structural solutions and the limited availability of data concerning the performance of these structural elements. Experimental tests indicated that the blocks presented a characteristic compressive strength of 4.86 MPa (gross area), complying with the NBR 15270-1 (ABNT, 2023), although their water absorption (22.83%) exceeded the normative limits. The prisms and small walls exhibited average compressive strengths of 1.66 MPa and 0.98 MPa, respectively, with their deformation behavior monitored through Digital Image Correlation (DIC). A three-dimensional numerical model was also developed in ANSYS 2025 R2, incorporating realistic physical and geometric properties. The results demonstrated that the small walls exhibited significantly lower load-bearing capacity than the blocks and prisms, mainly due to their higher slenderness and discontinuities at the block interfaces. Although the numerical model reproduced general behavioral tendencies, the discrepancy of approximately 20% relative to experimental results prevented its validation, and it was therefore employed solely for exploratory purposes. Nevertheless, the numerical analyses provided relevant initial insights for future investigations and for the refinement of computational models applied to BCEPQ structural elements.

Keywords: BCEPQ, Experimental Testing, Static Loads, Dynamic Loads, Numerical Modeling.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A alvenaria constitui um dos sistemas construtivos mais antigos, com registros de uso desde os primórdios da civilização. Inicialmente, empregavam-se blocos de pedra devido à abundância desse recurso na natureza. Ao longo do tempo, a técnica evoluiu, incorporando outros materiais, como os tijolos de argila. Inúmeras estruturas feitas com esses materiais remontam a séculos ou até milênios atrás, tornando-se marcos históricos importantes. Um exemplo notável são as três pirâmides de Guizé, no Egito (2600 a.C.), conhecidas como Quéfren, Queóps e Miquerinos.

Até meados do século XX, as estruturas em alvenaria eram construídas de forma empírica, e não havia conhecimento das técnicas de racionalização. Por isso, não se podia garantir a segurança da edificação, o que levava ao superdimensionamento dos elementos e à substituição do sistema por outros mais racionais e competitivos, como o concreto armado e o aço (Cerqueira e Mendes, 2018). Em 1889, foi construído o Edifício Monadnock, em Chicago (EUA), símbolo da alvenaria estrutural moderna, como mostra a Figura 1.



Figura 1 - Edifício Monadnock
Fonte: Vitruvius, 2006.

No Brasil, em 1964 o governo criou o banco nacional de habitação (BNH) que desempenhou um papel crucial no financiamento da habitação e no desenvolvimento urbano do país. Além disso, durante os primeiros quinze anos do século XXI, a indústria da construção civil experimentou um notável período de expansão e desenvolvimento, impulsionado principalmente pelo crescimento econômico. Destacam-se nesse contexto programas governamentais, como o Minha Casa Minha Vida, que impulsionou investimentos em infraestrutura e políticas sociais de habitação. Vale ressaltar, também, os grandes eventos esportivos de alcance global sediados no país em 2014 e 2016, que demandaram um considerável volume de obras e infraestrutura.

Observando esse cenário, é crucial possuir conhecimento em técnicas e materiais que possibilitem a aceleração dos processos construtivos e, ao mesmo tempo, a manutenção de elevados padrões de qualidade. Desta forma, a utilização da alvenaria estrutural surge como opção viável ao concreto armado, devido às suas diversas vantagens, como economia de material, redução do desperdício, entre outros benefícios.

Como alternativa, a utilização de blocos cerâmicos em construções de alvenaria estrutural se mostra viável devido a sua elevada capacidade resistente (Marvila *et al.*, 2019). Os blocos cerâmicos desempenham um papel crucial na alvenaria estrutural, conferindo resistência, durabilidade e conforto térmico às construções. Esses materiais são conhecidos por seus custos de fabricação relativamente baixos (Santos, 2021).

A cerâmica engloba produtos que, após a queima em altas temperaturas em fornos, adquirem coloração avermelhada. Além de ser empregada em utensílios domésticos e decoração, são amplamente utilizadas na construção civil, incluindo tijolos, blocos de vedação e estruturais, telhas, lajes, tubos e argilas expandidas (ABC, 2016). Campos dos Goytacazes possui um polo industrial de cerâmica vermelha vasto, possuindo mais de 100 indústrias. Isso se dá devido às grandes reservas de argila na região. A cidade é conhecida como a segunda maior fabricante de tijolos do Brasil, representando cerca de 40% da produção do estado do Rio de Janeiro (Ramos *et al.*, 2006); (Pedrotti *et al.*, 2011).

No Brasil as estruturas contemporâneas, em geral, são projetadas para suportar cargas estáticas, mas em certas circunstâncias, é crucial considerar os efeitos das cargas dinâmicas, que frequentemente surgem de máquinas em

operação, ventos, tráfego de veículos e atividades humanas, entre outros fatores. Essas cargas dinâmicas podem resultar em níveis significativos de vibração, podendo causar desconforto para as pessoas, representando, um risco para a integridade estrutural.

A fim de aprofundar a compreensão sobre práticas construtivas tradicionais, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o propósito de investigar a capacidade resistente das estruturas em alvenaria e garantir maior segurança às edificações. Essas investigações focam tanto na aplicação de técnicas adequadas quanto no conhecimento aprofundado dos materiais utilizados (Figueiredo *et al.*, 2013). Em projetos de edificações em alvenaria estrutural, é essencial realizar a análise da deformabilidade e dos deslocamentos da estrutura, pois, esses fatores influenciam diretamente no desempenho e na segurança da construção.

O bloco cerâmico extrudado, prensado e queimado (BCEPQ) apresenta potencial para, futuramente, consolidar-se como uma inovação de destaque voltada à racionalização da alvenaria estrutural. A Figura 2 mostra os blocos após fabricação.



Figura 2 - BCEPQ após extrusão, prensagem e queima.

Seu sistema de encaixe macho e fêmea tende a possibilitar uma modulação precisa, o que deverá otimizar a execução das obras e reduzir o consumo de argamassa de assentamento. Esse avanço tem a propensão de fortalecer a competitividade da indústria cerâmica no estado do Rio de Janeiro, além de contribuir para a valorização dos produtos da região de Campos dos Goytacazes no mercado da construção civil. Nesse contexto, esta pesquisa se propõe a investigar o comportamento de prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural utilizando blocos cerâmicos, por meio da aplicação de cargas estáticas e dinâmicas.

Dessa forma, este trabalho contribui significativamente para a literatura ao fornecer dados detalhados sobre o comportamento dos BCEPQ sob ações de cargas variadas, possibilitando sua incorporação em projetos estruturais com maior segurança e confiabilidade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente projeto tem como objetivo geral investigar o comportamento estrutural de blocos, prismas e pequenas paredes construídas com BCEPQ, considerando a aplicação de cargas estáticas e dinâmicas, utilizando ensaios experimentais e modelagem computacional. Avaliando a partir da aplicação destas cargas, parâmetros como resistência, deformabilidade, modos de ruptura, frequências naturais e resposta vibratória dessas estruturas.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa estão listados a seguir.

- Caracterizar os blocos cerâmicos estruturais quanto às propriedades geométricas, físicas e mecânicas.
- Avaliar o comportamento estrutural de prismas e pequenas paredes de alvenaria sob carregamentos estáticos verticais, identificando resistência e modos de ruptura.
- Investigar as deformações e parâmetros associados, como o coeficiente de Poisson, utilizando a técnica de Correlação de Imagem Digital (DIC).
- Desenvolver modelos numéricos no software Ansys R2 2025 para simulação estática e dinâmica, incluindo vibrações e impactos.
- Comparar os resultados experimentais e numéricos, verificando a representatividade dos modelos computacionais.
- Propor recomendações para otimização da modelagem numérica e subsidiar futuras pesquisas, especialmente relacionadas ao comportamento dinâmico.

1.3 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por materiais de construção mais eficientes, sustentáveis e com melhor desempenho mecânico tem impulsionado avanços significativos na Engenharia Civil, especialmente no aprimoramento de elementos estruturais que aliam segurança, eficiência térmica e viabilidade econômica. Nesse cenário, os BCEPQ despontam como uma solução inovadora para aplicações em alvenaria estrutural e de vedação, destacando-se por características como, redução do consumo de argamassa e potencial aumento na resistência mecânica, visto que, o valor de 4,86 MPa é superior a normativa brasileira.

A utilização de blocos cerâmicos estruturais é amplamente difundida no setor da construção civil brasileira, especialmente em obras de habitação popular. Com o crescimento de construções em áreas sujeitas a vibrações, tráfego intenso ou eventos sísmicos, torna-se imprescindível compreender como essas paredes respondem a esses tipos de esforços. No entanto, o estudo do comportamento desses blocos mediante a ações estáticas e dinâmicas ainda é pouco explorado na literatura, além da ausência de diretrizes normativas específicas para os BCEPQ no Brasil. Isso reforça a necessidade de estudos que forneçam parâmetros técnicos para o aprimoramento de normas e recomendações construtivas.

A investigação acerca do comportamento estrutural de prismas e pequenas paredes de blocos cerâmicos estruturais é fundamental para compreender a resposta da alvenaria frente a cargas estáticas e dinâmicas. A resistência desses blocos apresenta significativa variabilidade, geralmente entre 3 e 8 MPa, influenciada pelo processo produtivo e pela geometria (Silva *et al.*, 2022; Garcia, 2000). Essa condição impacta diretamente a rigidez, a fissuração e os modos de ruptura, aspectos essenciais para a avaliação da segurança e da durabilidade das edificações. Nesse sentido, a investigação experimental e numérica de prismas e pequenas paredes fornece subsídios práticos e científicos para a adequação às prescrições normativas e para a otimização do desempenho estrutural.

Adicionalmente, a utilização de modelagem numérica para prever o comportamento estrutural desses blocos sob condições adversas representa um

campo em constante desenvolvimento. As simulações computacionais, por meio da análise pelo Método dos Elementos Finitos (FEM) no software ANSYS 2025 R2, possibilitam a validação dos dados experimentais e a extrapolação de diferentes cenários de aplicação, consolidando-se como uma ferramenta fundamental para a engenharia preditiva e a otimização de materiais construtivos.

A sustentabilidade também se insere nesse contexto. Estruturas resilientes e duráveis contribuem de forma significativa para a sustentabilidade a longo prazo das construções. Compreender como ocorre a ruptura e como a estrutura se comporta frente a variadas cargas pode promover a construção de edifícios mais duradouros e menos suscetíveis a danos, reduzindo, por conseguinte, a necessidade de reconstruções frequentes e minimizando o desperdício de recursos de construção.

O estudo desses efeitos também pode impulsionar a inovação tecnológica na construção civil, fomentando o desenvolvimento de materiais mais avançados e técnicas de construção mais eficazes, ao mesmo tempo em que possibilita melhorias contínuas no conhecimento e nas práticas da engenharia civil.

Em síntese, a pesquisa dos efeitos das cargas estáticas e dinâmicas em alvenaria estrutural desempenha um papel crucial na garantia da segurança, eficiência e sustentabilidade das construções, ao mesmo tempo em que impulsiona o progresso da engenharia civil, uma vez que os blocos, foco desta pesquisa, não são explorados na literatura técnica, com diversos parâmetros físicos e mecânicos carecendo de investigação mais aprofundada. Portanto, espera-se resultados satisfatórios e um estudo rico e com uma gama de dados que possa ser utilizado para futuros trabalhos na área, contribuindo assim para a pesquisa brasileira.

1.4 ESCOPO DO TRABALHO

Após este capítulo inicial de introdução, onde o tema e os objetivos são delineados, a estrutura do texto se desdobra da seguinte maneira:

O Capítulo II se inicia com uma revisão de literatura com apoio bibliométrico e uma revisão bibliográfica detalhada, explorando os principais conceitos da pesquisa. No Capítulo III, descreve-se a metodologia aplicada para

alcançar cada objetivo específico do estudo, incluindo a descrição dos materiais utilizados na pesquisa. O Capítulo IV apresenta os resultados experimentais e os resultados da simulação numérica realizada no *Ansys*, para a alvenaria estrutural feita de blocos cerâmicos.

Por fim, as conclusões da pesquisa e sugestões para futuras investigações estão discutidas no Capítulo V, enquanto as referências utilizadas são listadas no capítulo de referências.

O texto também é complementado por Apêndices, os quais contribuem para a compreensão dos resultados obtidos nesta pesquisa e permitem a verificação de tabelas e figuras, reforçando a transparência e a robustez do estudo.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que sustenta a presente pesquisa, com foco nos principais conceitos e estudos vinculados ao desempenho estrutural dos BCEPQ. A revisão da literatura foi organizada com o objetivo de oferecer uma visão abrangente sobre o uso da cerâmica vermelha na construção civil, destacando o comportamento mecânico de materiais cerâmicos quando submetidos a ações estáticas e dinâmicas. Além disso, são discutidas as abordagens de modelagem numérica empregadas na previsão do desempenho estrutural dos blocos, prismas e pequenas paredes.

2.1 REVISÃO DE LITERATURA COM APOIO BIBLIOMÉTRICO

Diferente do que é feito usualmente, optou-se uma revisão de literatura com apoio bibliométrico, para reunir e analisar, de forma criteriosa e organizada, estudos já publicados sobre um tema específico, com o objetivo de sintetizar evidências disponíveis. A elaboração seguiu as etapas delineadas no fluxograma da Figura 3.

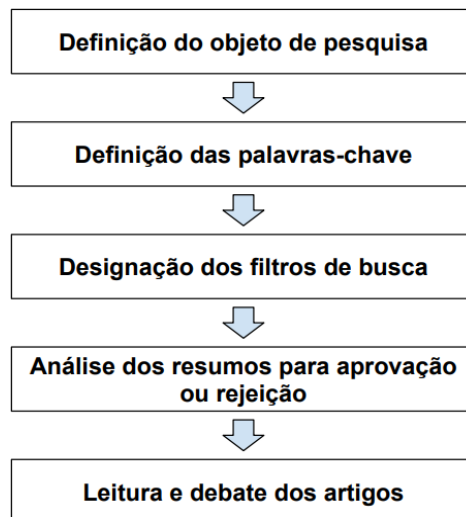


Figura 3 - Fluxograma das etapas de uma revisão bibliográfica sistemática.

Inicialmente, a pesquisa foi direcionada ao estudo da alvenaria estrutural, definindo esse sistema construtivo como o foco central da investigação. Esta decisão decorre do crescente interesse em compreender e examinar os tipos de cargas que a alvenaria estrutural pode suportar.

Na segunda etapa do desenvolvimento da revisão, foram definidas as palavras-chave. As palavras mais utilizadas foram: “cargas dinâmicas”, “alvenaria estrutural” e “blocos cerâmicos”. O objetivo da utilização dessas palavras, foi a identificação de trabalhos que tenham estudado o efeito das cargas dinâmicas em alvenaria estrutural utilizando blocos cerâmicos e, se possível, a modelagem de estruturas utilizando o Ansys.

As palavras citadas anteriormente foram aplicadas nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*. Alguns filtros foram aplicados para a extração dos resumos, como por exemplo: artigos revisados por pares, ano de publicação, e palavras-chave em inglês. As palavras em inglês utilizadas foram: *Dynamic Loads*, *Structural Masonry*, *Ansys*, *Ceramic Blocks*, *Small Walls*, todas as palavras utilizando “and” para pesquisa na base de dados. A Tabela 1 mostra os resultados encontrados nas bases de dados pesquisadas, utilizando os diversos filtros aplicados, número de documentos representa uma totalidade.

Tabela 1 - Resultados de pesquisa.

| Palavras-chave | Documentos |
|---|------------|
| Cargas Dinâmicas, Alvenaria Estrutural | 1.276 |
| Cargas Dinâmicas, Alvenaria Estrutural, Blocos Cerâmicos, Pequenas Paredes | 120 |
| Cargas Dinâmicas, Alvenaria Estrutural, <i>Ansys</i> | 23 |

Fonte: Adaptado, *Scopus* e *Web of Science*.

A Figura 4 apresenta a evolução do número de artigos publicados ao longo dos anos. A pesquisa foi realizada na base de dados Scopus, utilizando as palavras-chave listadas na Tabela 1.

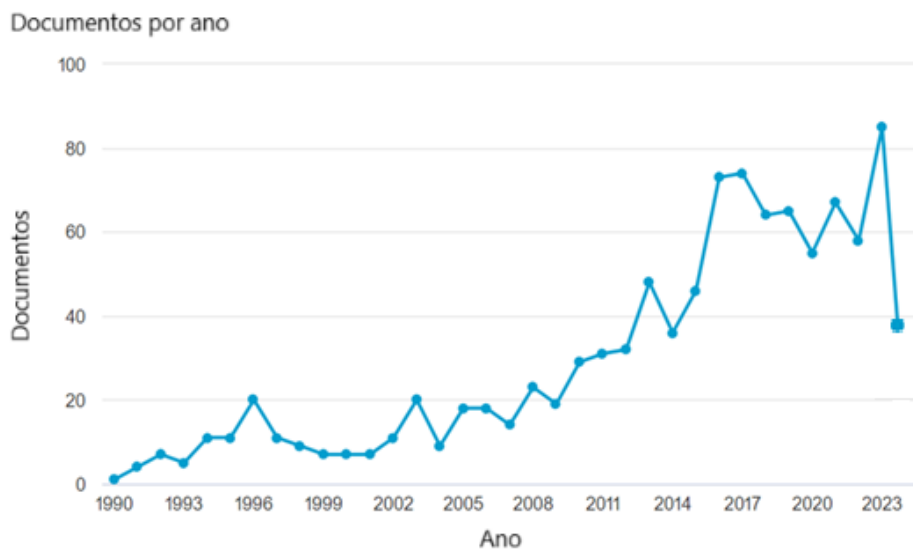


Figura 4 - Documentos por ano.
Fonte: Adaptado, *Scopus*.

O gráfico indica que a produção documental aumentou bastante a partir da década de 2010, mostrando crescimento e maior interesse ou investimento na área relacionada aos documentos registrados. O aumento do número de publicações de artigos científicos está diretamente relacionado ao avanço tecnológico observado nas últimas décadas. O desenvolvimento e a popularização de ferramentas digitais, plataformas de comunicação científica e bases de dados online têm proporcionado maior agilidade no processo de produção, revisão e divulgação do conhecimento.

Na Figura 5 são apresentados os países em que mais foram publicadas pesquisas de acordo com as palavras-chave delimitadas. O eixo horizontal representa a quantidade de documentos, e o eixo vertical indica os países

correspondentes. A Itália lidera com uma quantidade bem superior de documentos, chegando a cerca de 320, já os Estados Unidos aparecem em segundo lugar, com aproximadamente 85 documentos. China, Reino Unido, Grécia, Índia, Portugal e Turquia têm números mais próximos entre si, variando entre cerca de 45 e 65 documentos cada um.

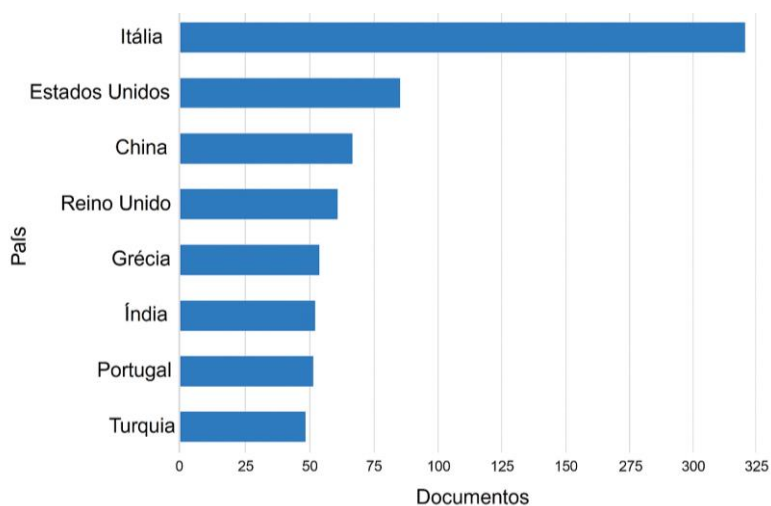


Figura 5 - Documentos por países.

Fonte: Adaptado, *Scopus*.

Também foi feita uma pesquisa com os principais autores na área. A Figura 6 mostra os resultados após a pesquisa, utilizando a *Scopus* como base de dados. As palavras-chave empregadas foram selecionadas de acordo com critérios previamente definidos e estão integralmente listadas na Tabela 1, a qual apresenta os termos utilizados para a realização das buscas.

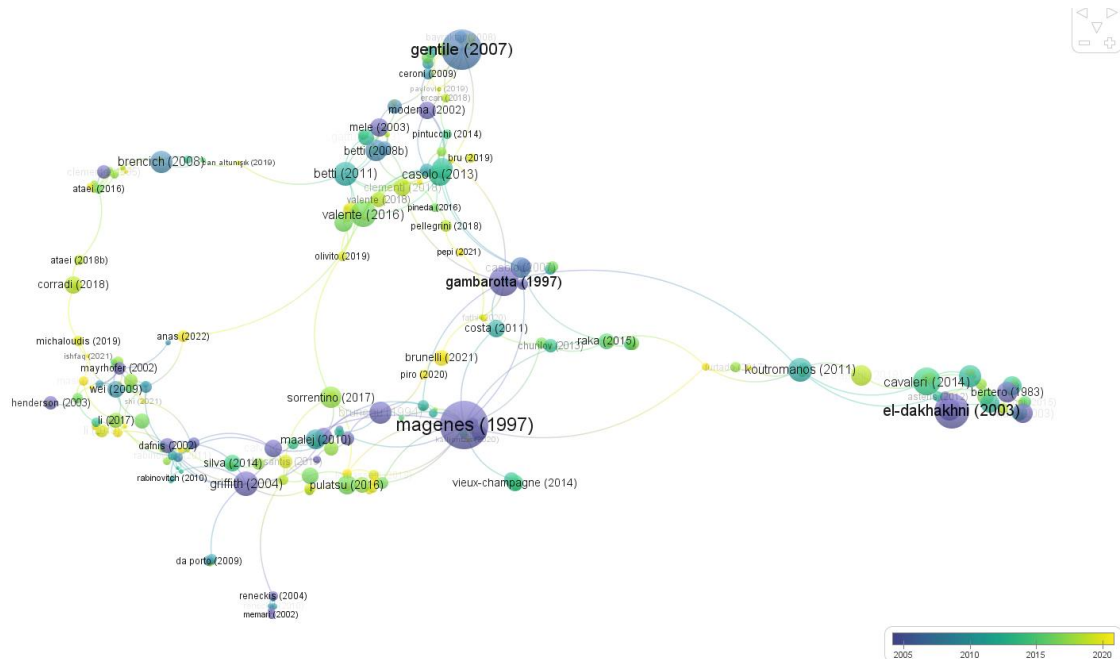


Figura 6 - Autores recorrentes.
Fonte: VOSviewer.

Os autores citados na Figura 7, desempenham um papel fundamental no avanço do conhecimento sobre a produção de blocos cerâmicos. Seus estudos fornecem bases teóricas e práticas que ajudam a compreender desde os processos produtivos e a caracterização dos materiais até a análise do desempenho dos blocos em diferentes condições de uso. As palavras-chave utilizadas para esta pesquisa foram: Blocos cerâmicos e Blocos Estruturais.

Para identificar autores que trabalham com blocos cerâmicos, realizou-se a busca na base Scopus usando uma *string* estruturada com operadores booleanos. Utilizou-se termos específicos e variações do tema principal, como "bloco cerâmico" e "bloco cerâmico estrutural", garantindo uma abrangência adequada. Além disso, incluí palavras-chave técnicas relacionadas aos aspectos estudados, como "propriedades", "desempenho" e "fabricação", para focar nos artigos que apresentam análises aprofundadas desses materiais. A busca foi feita no campo título, resumo e palavras-chave da Scopus, para assegurar a relevância dos resultados encontrados.

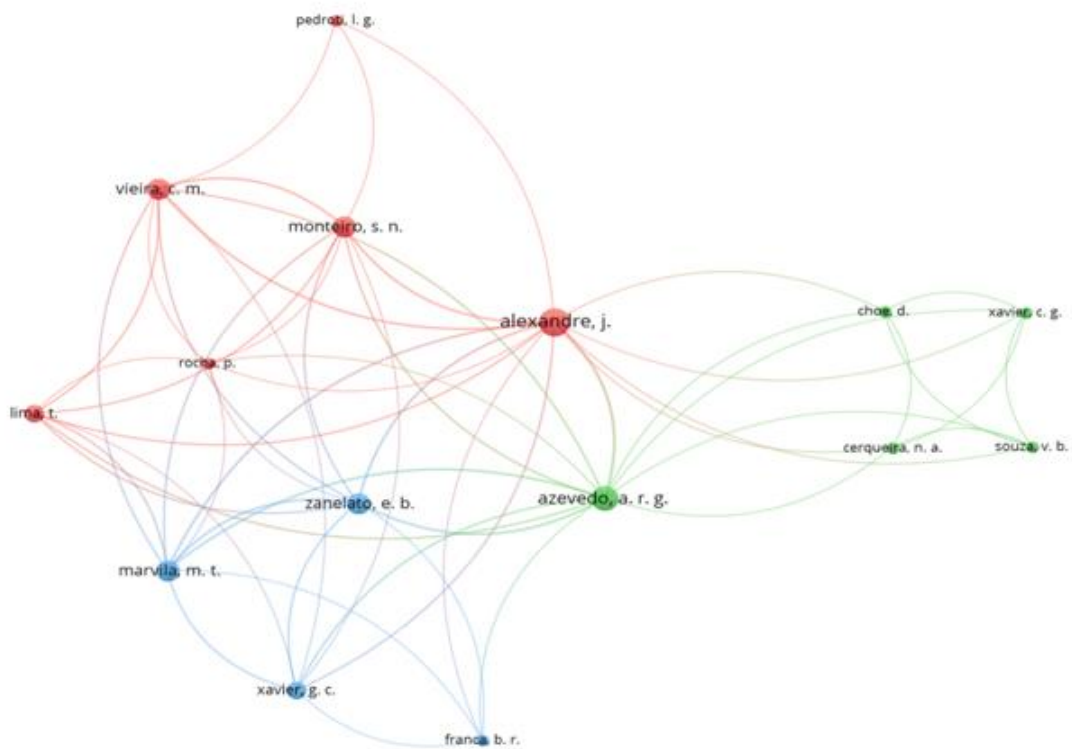


Figura 7 - Autores mais citados.
Fonte: VOSviewer.

2.2 CERÂMICA VERMELHA

A considerável capacidade produtiva da indústria brasileira de cerâmica vermelha, juntamente com o interesse das construtoras em impulsionar a competitividade e reduzir custos, têm despertado, nos últimos anos, um crescente interesse dos fabricantes cerâmicos em investir na produção de blocos cerâmicos estruturais. A fabricação de blocos cerâmicos estruturais na região norte fluminense ainda é limitada em comparação com outras peças produzidas, entretanto, com o crescimento do mercado imobiliário, o produto pode conquistar uma maior participação, desde que haja produção e divulgação adequada de conhecimento técnico para sua utilização.

Os materiais cerâmicos são constituídos por combinações de elementos metálicos e não metálicos, resultando, predominantemente, na formação de compostos como óxidos, nitretos e carbonetos — a exemplo da alumina (Al_2O_3), sílica (SiO_2), carbeto de silício (SiC) e nitreto de silício (Si_3N_4). Tais materiais distinguem-se por sua elevada rigidez e resistência mecânica, muitas vezes comparáveis às das ligas metálicas, além de apresentarem notável dureza e

excelente estabilidade química. Embora apresentem comportamento frágil por natureza, os avanços tecnológicos recentes têm contribuído significativamente para o aumento de sua tenacidade à fratura, ampliando sua aplicabilidade em sistemas estruturais. (Callister e Rethwisch, 2016).

2.3 BLOCOS CERÂMICOS

Os blocos cerâmicos, ou tijolos, juntamente com os blocos de concreto, constituem um dos elementos fundamentais em qualquer construção de alvenaria, seja para vedação ou estruturação. Feitos principalmente de argila e geralmente em formato de paralelepípedo, os blocos cerâmicos, possuem cor avermelhada e apresentam canais ou furos ao longo de sua estrutura. A função primordial é o fechamento de paredes, podendo, também, desempenhar função estrutural. Quando utilizados na alvenaria estrutural, os blocos exercem um papel crucial, proporcionando resistência mecânica, durabilidade e isolamento térmico às edificações (Santos, 2021; Martinez, 2017).

As Normas Brasileiras são fundamentais na padronização e garantia da qualidade dos blocos cerâmicos utilizados nas construções. Essas normas estabelecem critérios para dimensões, resistência mecânica, absorção de água, entre outras características essenciais, garantindo a segurança e a durabilidade das edificações. A Tabela 2, mostra as normas sobre blocos cerâmicos no Brasil.

Tabela 2 - Normas sobre blocos cerâmicos.

| Normas Brasileiras | Blocos Cerâmicos |
|---------------------------|-------------------------|
| Requisito | ABNT NBR 15270-1 (2023) |
| Projeto | ABNT NBR 16868-1 (2020) |
| Execução | ABNT NBR 16868-2 (2020) |
| Metodologia de Ensaio | ABNT NBR 15270-2 (2023) |
| | ABNT NBR 16868-3 (2020) |

Fonte: Autoria própria.

2.3.1 Blocos cerâmicos de vedação

Os blocos cerâmicos de vedação são utilizados exclusivamente para formar paredes não estruturais, ou seja, não suportam cargas estruturais além do seu próprio peso e das cargas de revestimento. Sua principal função é dividir ambientes e isolar acusticamente ou termicamente os espaços internos da edificação.

De acordo com a NBR 15270-1 (ABNT, 2023) esses blocos devem atender requisitos relacionados principalmente à absorção de água, resistência mínima para transporte e manuseio, e dimensionalidade, mas não possuem exigência de resistência estrutural.

Suas principais características incluem:

- Baixo peso próprio, facilitando o transporte e assentamento;
- Alta porosidade, o que melhora o desempenho térmico, mas pode prejudicar a resistência mecânica;
- Presença de furos verticais ou horizontais para reduzir peso e facilitar a instalação de tubulações;
- Dimensões variadas, geralmente mais finos do que os blocos estruturais.

Conforme Silva *et al.* (2010), o uso dos blocos de vedação é vantajoso em termos de custo e rapidez construtiva, mas sua fragilidade mecânica impõe limitações, como a proibição de uso em paredes sujeitas a cargas estruturais ou impacto significativo.

Outro ponto relevante é que esses blocos não permitem reforços estruturais embutidos, como armaduras ou grauteamento, diferentemente dos blocos estruturais. Portanto, não são indicados para áreas sujeitas a esforços fora do plano ou ações horizontais, como zonas sísmicas ou paredes externas expostas a ventos fortes. A Figura a seguir, mostra dois exemplos de blocos para vedação, sendo 8(a) com furos na horizontal e 8(b) com furos na vertical.

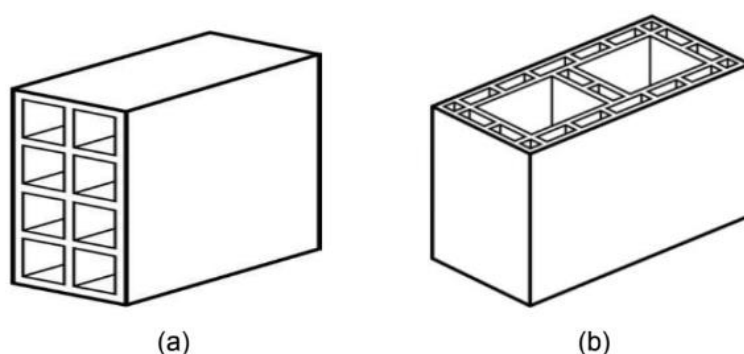


Figura 8 - Blocos cerâmicos de vedação.
Fonte: NBR 15270-1 (ABNT, 2023).

2.3.2 Blocos cerâmicos estruturais

Os blocos cerâmicos estruturais diferenciam-se por serem projetados para suportar cargas estruturais, além do peso próprio da alvenaria. São utilizados em sistemas de alvenaria estrutural, onde as paredes funcionam como parte integrante da estrutura da edificação.

Esses blocos devem atender aos critérios da NBR 15270-1 (ABNT, 2023), incluindo:

- Resistência característica à compressão mínima: $\geq 4,0$ MPa.
- Intervalo de absorção de água: $8\% \leq 21\%$.
- Controle dimensional rigoroso, para garantir alinhamento e estabilidade da parede.

Sua geometria inclui septo mais espesso e células verticais contínuas, que podem ser preenchidas com graute e armaduras para aumentar a resistência estrutural, especialmente em regiões críticas. A Figura 9 mostra diferentes tipos de blocos estruturais.

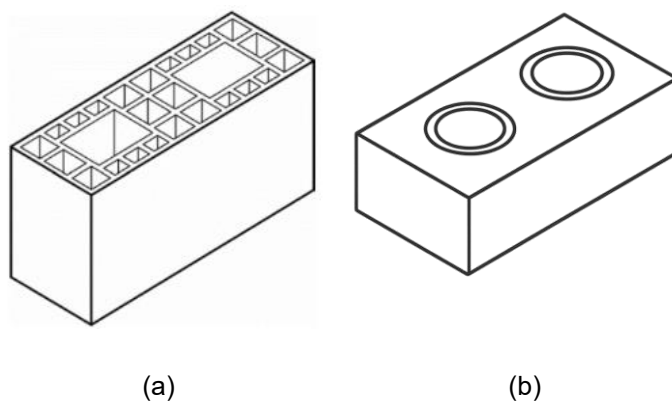


Figura 9 - Blocos cerâmicos estruturais, (a) furo retangular e (b) furo circular.
Fonte: Adaptado, NBR 15270-1 (ABNT, 2023).

De acordo com Cavalcanti e Almeida (2012), os blocos cerâmicos estruturais são essenciais para viabilizar sistemas de construção racionalizados, com ganhos em produtividade, economia de materiais e eliminação de formas e escoramentos tradicionais.

Esses blocos também contribuem para o isolamento térmico e acústico da edificação, além de apresentarem bom desempenho em situações de

compressão. Entretanto, devido à baixa resistência à tração e ao cisalhamento, exigem atenção especial no projeto para resistir a ações horizontais e cargas fora do plano, principalmente em paredes curtas ou prismas (Motamedi *et. al.*, 2021). A Tabela 3 apresenta as dimensões admissíveis para a utilização de blocos estruturais, tanto cerâmicos quanto de concreto, conforme os parâmetros normativos aplicáveis. Esses valores são dispostos de forma a possibilitar a comparação entre os dois materiais, evidenciando diferenças dimensionais relevantes para o entendimento das particularidades de cada tipologia.

Tabela 3 - Tolerâncias dimensionais para blocos estruturais.

| Propriedade | Dimensões nominais dos blocos padrões fabricados (mm) | Tolerância (mm) p/ blocos cerâmicos (NBR 15270-1, 2017) | Tolerância (mm) p/ blocos de concreto (NBR 6136, 2016) |
|-----------------|---|---|--|
| Largura (L) | 190 ; 140 | ± 2 | ± 3 |
| Altura (H) | 190 | ± 3 | ± 3 |
| Comprimento (C) | 290 ; 390 | ± 3 | ± 3 |

Fonte: Adaptado, NBR 15270-1 e NBR 6136.

A literatura internacional sobre alvenaria estrutural em blocos cerâmicos reforça a relevância de abordagens experimentais e numéricas combinadas para a compreensão do comportamento mecânico desses sistemas. Serpilli, Cameli e Stazi (2024) realizaram uma caracterização detalhada do cisalhamento *in-plane* de alvenarias executadas com blocos cerâmicos vazados de alta eficiência térmica, integrando ensaios experimentais e modelagem via elementos finitos para avaliar o desempenho sob diferentes estados de tensão. Resultados semelhantes quanto à importância da análise combinada são discutidos em estudos posteriores, como os de Milani (2021), que investigam experimentalmente o comportamento mecânico de blocos e pequenas paredes, considerando variáveis geométricas e condições de carregamento que influenciam a resposta estrutural. Em conjunto, esses trabalhos oferecem uma base consolidada para validação de modelos numéricos, interpretação de ensaios laboratoriais e compreensão da variabilidade tipicamente observada em sistemas de alvenaria estrutural cerâmica.

2.3.3 Blocos cerâmicos extrudados, prensados e queimados

Há várias abordagens para produzir blocos cerâmicos, e este tópico enfoca o processo de fabricação e os padrões normativos dos blocos que se aproximam mais da nova unidade cerâmica estudada neste trabalho, o BCEPQ.

Ao entender as práticas existentes na indústria cerâmica, é possível analisar como o BCEPQ se integra nesse contexto, identificando suas semelhanças e diferenças em relação aos métodos convencionais de produção e aos padrões normativos estabelecidos para garantir qualidade e conformidade dos blocos cerâmicos. Essa análise comparativa proporciona melhor compreensão sobre o desempenho, contribuindo para melhor avaliação de potenciais aplicações e benefícios na construção civil.

A fabricação desses blocos cerâmicos se inicia com as argilas passando por um processo de moldagem plástica por meio da extrusão. Em seguida, as peças são cortadas e passam por uma etapa de secagem para remover a umidade e evitar o surgimento de tensões e defeitos durante a queima. Posteriormente, o corpo cerâmico é submetido a altas temperaturas em fornos específicos (Pedroti *et al.*, 2011). Essas etapas de fabricação dos blocos são apresentadas na Figura 10.



Figura 10 - Fluxograma do processo de fabricação de blocos cerâmicos.

Fonte: Autoria própria.

O solo argiloso utilizado como matéria-prima para a produção dos blocos foi coletado na região de São Sebastião/RJ. O processo de conformação iniciou-se pela extrusão em equipamento modelo WD36, seguida do corte das unidades por lâmina de cobre. Posteriormente, os blocos foram submetidos à prensagem

em prensa hidráulica modelo ECO Master 7000. Após a prensagem, as amostras foram encaminhadas ao processo de queima em forno do tipo abóbada, operando a aproximadamente 800 °C.

2.4 ALVENARIA ESTRUTURAL

Conforme relatado por Pedroti *et al.* (2011) e por Cerqueira *et al.* (2020), a alvenaria estrutural é um método construtivo que se destaca por empregar a parede como elemento principal de suporte da edificação. Nesse processo, a carga é distribuída ao longo do plano da parede, que desempenha funções estruturais, além de servir como vedação.

Na alvenaria estrutural, o sistema construtivo se baseia na utilização de blocos como unidade modular básica, os quais, combinados com argamassa, formam as paredes. Estas têm a função de absorver todas as tensões normais e de cisalhamento oriundas das ações atuantes. Assim, o desempenho da estrutura é assegurado pela rigidez da edificação, que é alcançada por meio da conexão entre as paredes estruturais nas duas direções principais. O critério de segurança é satisfeito quando a capacidade resistente do elemento é maior do que as tensões que atuam sobre ele (Mohamad, 2020).

2.4.1 Tipos de alvenaria estrutural

Existem vários tipos de alvenaria, e eles variam de acordo com os materiais utilizados, a forma como são dispostos e a finalidade de aplicação. Os três principais tipos de alvenaria estrutural, são: alvenaria armada, alvenaria não armada e alvenaria protendida. Além disso, essas estruturas podem ser construídas com diferentes tipos de blocos, sendo classificadas também como alvenaria estrutural com blocos de concreto, alvenaria estrutural com blocos cerâmicos e alvenaria estrutural mista, que é quando há a utilização de diferentes blocos em uma mesma estrutura.

De acordo com Tauil e Nesse (2010), a alvenaria armada ou parcialmente armada é reforçada em regiões específicas por motivo de necessidades estruturais. São introduzidas armaduras passivas, como barras, fios e telas de aço nos vazios dos blocos, seguidas de grauteamento e preenchimento de todas as juntas verticais. Por outro lado, a alvenaria não armada recebe graute e

reforços de aço apenas para fins construtivos, podendo, assim, evitar fissuras. Por fim, a alvenaria protendida é fortalecida por uma armadura ativa (pré-tensionada), submetendo-a a esforços de compressão.

2.4.2 Componentes da alvenaria estrutural

Como qualquer outro sistema construtivo, a alvenaria estrutural possui vantagens. A aplicação desse tipo de estrutura como método construtivo, permite segurança estrutural, durabilidade e sustentabilidade.

Sendo assim, a construção de edifícios de alvenaria estrutural deve possuir alguns elementos essenciais, que são: unidades, argamassa, graute e, eventualmente, armaduras construtivas (ativas ou passivas). Conforme descrito por Parsekian (2012), cada um desses elementos é definido da seguinte maneira:

- Unidades: blocos ou tijolos que determinam a capacidade resistente da estrutura. Podem ser vazados ou maciços, são considerados maciços aqueles com até 25% de vazios, enquanto os que excedem esse limite são classificados como vazados;
- Argamassa: desempenha o papel de ligação entre as unidades, unindo-as solidamente. Além disso, ela permite pequenas deformações, protege o interior contra a entrada de água e vento nas edificações e deve exibir boas características de trabalhabilidade, durabilidade e resistência;
- Graute: é um concreto fluido que preenche os vazios dos blocos, proporcionando aderência e aumentando a resistência da parede sem a necessidade de elevar a resistência das unidades.
- Armaduras Construtivas: empregadas conforme demanda (em alvenaria armada) para atender exigências construtivas e suportar esforços de tração ou compressão.

2.4.3 Prismas e pequenas paredes

A norma NBR 16868-2 (ABNT, 2020) sugere uma abordagem para analisar o comportamento de paredes estruturais, que envolve o uso de prismas compostos por dois blocos. Contudo, a altura desses prismas impacta na resistência à compressão. Deve-se garantir que a altura seja suficientemente

curta para evitar a influência do efeito de esbeltez no ensaio, mas não tão curta a ponto de sofrer restrições das placas de aplicação de carga nas extremidades do prisma.

Um prisma consiste na união de dois ou mais blocos por meio de juntas argamassadas, sendo destinado a ensaios de resistência à compressão. A Figura 11 mostra alguns modelos de prismas utilizados em análises experimentais.

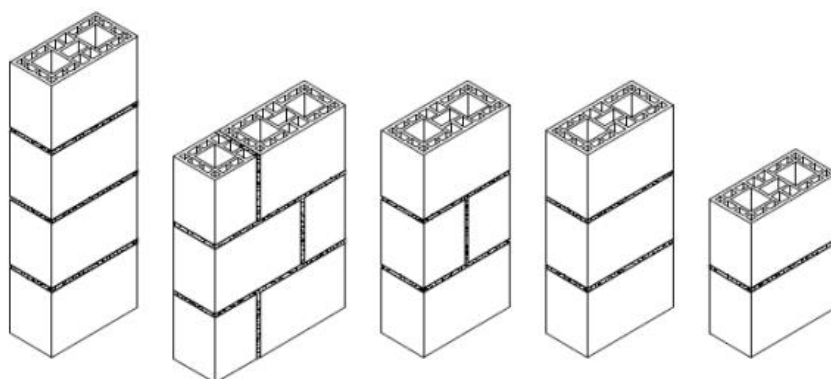


Figura 11 - Modelos de Prismas.
Fonte: Santos, (2008).

Na avaliação da qualidade dos materiais utilizados na alvenaria estrutural, os prismas de concreto desempenham um papel essencial, especialmente em ensaios de compressão realizados conforme a NBR 16868-2 (ABNT, 2020). Esses elementos podem ser moldados com juntas apenas horizontais ou com a inclusão de juntas verticais. Estudos anteriores sugerem que a configuração com ambos os tipos de juntas oferece uma melhor representação do comportamento real da alvenaria, além de favorecer o aumento da resistência ao cisalhamento (Parsekian *et al.*, 2007; Miranda e Corrêa, 2012).

Na modelagem numérica da alvenaria estrutural, os prismas são frequentemente utilizados para validar modelos constitutivos aplicados a blocos cerâmicos e suas juntas, visto que, que representam um conjunto mínimo capaz de expressar as não linearidades do material composto. Estudos recentes, como os de Lourenço (1996) e Mohamad *et al.* (2010), demonstram que prismas fornecem resultados adequados para a calibração de parâmetros como módulo de elasticidade, coeficientes de interação bloco–argamassa e limites de tensão em cada fase da resposta mecânica. Além disso, sua geometria simples facilita a análise paramétrica e a avaliação de diferentes estratégias de modelagem,

como elementos sólidos tridimensionais, interfaces coesivas ou modelos micro e macro.

Estudos mais recentes conduzidos por Cerqueira *et al.* (2018) aprofundaram a avaliação das propriedades físicas, mecânicas dos blocos e prismas, incluindo investigações sobre a deformação de elementos de alvenaria estrutural. Além disso, esses autores analisaram a resistência à compressão de blocos individuais, prismas e pequenas paredes, bem como os módulos de deformação e o coeficiente de Poisson, fornecendo subsídios técnicos para a aplicação dos blocos cerâmicos prensados (BPQ) em sistemas de alvenaria estrutural.

De acordo com Ramalho e Corrêa (2003), a capacidade resistente de paredes construídas com blocos cerâmicos é inferior àquela observada em alvenarias compostas por blocos de concreto. Os autores destacam que, embora o aumento da resistência do bloco contribua para a elevação da resistência da alvenaria como um todo, a eficiência da estrutura tende a diminuir. Esse comportamento está relacionado principalmente à forma geométrica e ao tipo de material utilizado nos blocos.

No caso específico dos blocos cerâmicos, os valores típicos de eficiência estrutural variam conforme a configuração analisada. Segundo Ramalho & Corrêa (2007), a eficiência parede/bloco ($\frac{f_{par}}{f_b}$) situa-se entre 0,2 e 0,5, enquanto a eficiência prisma/bloco ($\frac{f_p}{f_b}$) varia de 0,3 a 0,6. Esses índices são fundamentais para a compreensão do desempenho real da alvenaria.

As alternativas de ensaios com prismas e pequenas paredes tem o objetivo de viabilizar a execução dos experimentos, por serem mais simples do que os ensaios com paredes em escalas reais, as normas de ensaios e dimensionamentos oferecem opções alternativas aos testes em paredes de tamanho real, tais como análises de pequenas paredes e prismas.

Uma forma de avaliar o comportamento das paredes estruturais de forma estimada é através do uso de pequenas paredes. Conforme descrito no anexo B da norma NBR 16868-2 (ABNT, 2020) essas pequenas paredes devem ter uma altura de pelo menos cinco vezes a espessura do bloco e um comprimento igual ou superior a dois blocos. A Figura 12, mostra um exemplo de pequena parede e como são dispostos seus blocos na estrutura.



Figura 12 - Modelo de pequena parede.

Fonte: Cerqueira (2017).

A adoção de pequenas paredes como corpos de prova oferece uma série de vantagens operacionais e econômicas. Destacam-se, nesse contexto, a significativa redução de custos com materiais e mão de obra, a facilidade de transporte e manuseio das unidades experimentais, a possibilidade de controle mais preciso das variáveis envolvidas no processo, a celeridade na execução dos ensaios e a menor exigência quanto ao uso de equipamentos de grande porte. Essas características tornam as pequenas paredes instrumentos valiosos tanto na pesquisa acadêmica quanto na avaliação prática de soluções construtivas, contribuindo para o aprimoramento das técnicas empregadas na construção civil.

2.5 MODO DE RUPTURA DA ALVENARIA ESTRUTURAL

O modo de ruptura da alvenaria estrutural é um aspecto fundamental para a compreensão do seu comportamento mecânico e para o dimensionamento seguro e eficiente de edificações. Diferentemente dos sistemas estruturais usualmente tratados como homogêneos, como elementos de concreto armado, a alvenaria é um sistema composto por unidades (blocos ou tijolos) e juntas de argamassa, o que confere ao conjunto um comportamento anisotrópico e dependente da qualidade da interface entre seus componentes. A forma como ocorrem as falhas — seja por esmagamento dos blocos, fissuração da argamassa ou delaminação na interface bloco-argamassa — está diretamente relacionada a fatores como a resistência dos materiais, o tipo de carregamento, a presença de confinamento e as condições de contorno. A caracterização

desses modos de ruptura é essencial para prever a capacidade resistente da alvenaria, identificar os limites de linearidade do material e desenvolver modelos mais precisos para análise estrutural.

2.5.1 Comportamento não linear da alvenaria estrutural

O item 8.2.10 da NBR 6118 (ABNT, 2014), norma que regulamenta as diretrizes para o projeto de estruturas de concreto armado, estabelece que o concreto apresenta comportamento linear até aproximadamente 50% de sua resistência à compressão. De maneira análoga, sistemas de alvenaria estrutural também exibem comportamento linear até certo limite de tensão, sobretudo quando analisados sob a ótica da relação tensão-deformação específica.

No estudo conduzido por Fonseca *et al.* (2015), buscou-se investigar o comportamento mecânico do conjunto bloco-argamassa, com foco na identificação dos mecanismos de ruptura e da capacidade de deformação das paredes. Inicialmente, foram realizados ensaios de compressão axial em prismas compostos por três blocos de altura, tanto com confinamento quanto sem confinamento. Em seguida, paredes de alvenaria com cinco blocos de altura, também com e sem confinamento, foram submetidas a esforços de compressão axial e lateral.

A partir de um programa experimental abrangente, os autores observaram que o início da não-linearidade no comportamento da alvenaria está associado ao aumento das tensões laterais e do coeficiente de Poisson. Tal comportamento foi atribuído à formação de fissuras verticais tanto na argamassa quanto na interface bloco-argamassa, observadas quando as paredes atingiram cerca de 60% da resistência máxima à compressão.

Por sua vez, Mohamad *et al.* (2017) constataram que a falha nas estruturas de alvenaria se inicia no ponto em que o comportamento tensão-deformação dos prismas comprimidos deixa de ser linear. Essa transição está diretamente relacionada ao modo de ruptura dos corpos de prova, sendo que prismas moldados com argamassas de menor resistência apresentaram uma curva tensão-deformação menos acentuada, resultando em ruptura por esmagamento. Já os prismas confeccionados com argamassa de maior resistência apresentaram ruptura predominante por tração na região dos blocos.

2.5.2 Tipos de ruptura na alvenaria estrutural

Sob ações de carregamentos verticais, as paredes de alvenaria desenvolvem tensões horizontais tanto na argamassa de assentamento quanto nos blocos, em função da aderência existente na interface entre esses componentes. Essa interação promove o confinamento da argamassa, favorecendo a compatibilização das deformações na zona de contato entre os elementos constituintes do sistema.

Esse efeito de confinamento decorre da maior deformabilidade da argamassa em relação ao bloco. A aderência entre os materiais restringe a expansão lateral da junta, modificando o comportamento da argamassa em serviço. Dessa forma, o desempenho da argamassa em alvenaria difere substancialmente daquele obtido em ensaios convencionais de compressão e tração por flexão, conforme descrito na NBR 13279 (ABNT, 2005), os quais não consideram os efeitos da interação com o bloco nem a transferência de água da argamassa para o substrato.

Conseqüentemente, a avaliação do comportamento mecânico da alvenaria estrutural exige a análise integrada da capacidade resistente dos materiais, bem como de seus módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson, sob condições de tensões multiaxiais. Em alvenarias submetidas à compressão, o modelo de ruptura geralmente considera o bloco em regime de tensão biaxial de tração e a argamassa submetida a um estado triaxial de compressão, conforme proposto por Mohamad *et al.* (2006). A Figura 13 representa graficamente esse modelo de comportamento.

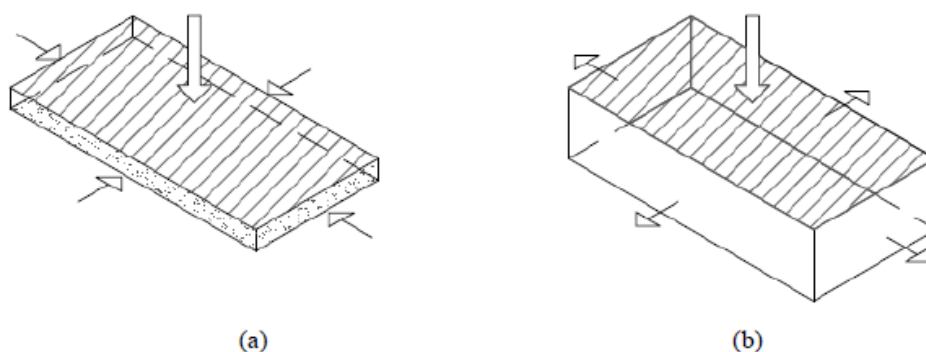


Figura 13 - (a) junta de argamassa comprimida triaxialmente; (b) bloco comprimido e tracionado biaxialmente.

Fonte: Lubeck, 2016.

O modo de ruptura da alvenaria estrutural é condicionado por quatro variáveis fundamentais: a resistência da aderência na interface argamassa-bloco, a resistência à compressão da argamassa de assentamento, a resistência à compressão dos blocos e a resistência à tração dos blocos (De LIMA, 2010). A investigação desse fenômeno é de grande relevância, uma vez que contribui para a compreensão da compatibilidade mecânica entre os materiais constituintes, favorecendo o desempenho global da parede sob carregamentos compressivos (Mohamad *et al.*, 2006).

Segundo a classificação proposta por Cheema e Klingner (1986), amplamente adotada na literatura técnica, os modos de ruptura em alvenarias estruturais podem ser agrupados em três categorias principais: (i) ruptura por tração no bloco; (ii) esmagamento do bloco; e (iii) esmagamento da junta de argamassa. Entretanto, o modo de ruptura (iii) não se aplica a esta pesquisa, pois os blocos são utilizados por encaixe.

A Figura 14 mostra as etapas de ruptura do bloco, na imagem (a) o bloco é submetido a compressão, no primeiro caso (b) a ruptura por tração no bloco manifesta-se quando a tensão principal de tração excede a resistência à tração do material cerâmico, provocando a fissuração e conseqüente falha do bloco. O segundo (c) modo de ruptura ocorre por esmagamento, quando a tensão principal de compressão no bloco ultrapassa sua capacidade resistente, levando à desintegração do material. Já o terceiro mecanismo de falha refere-se ao esmagamento da junta de assentamento, verificado quando a tensão de compressão axial aplicada à argamassa supera a resistência da argamassa confinada entre os blocos.

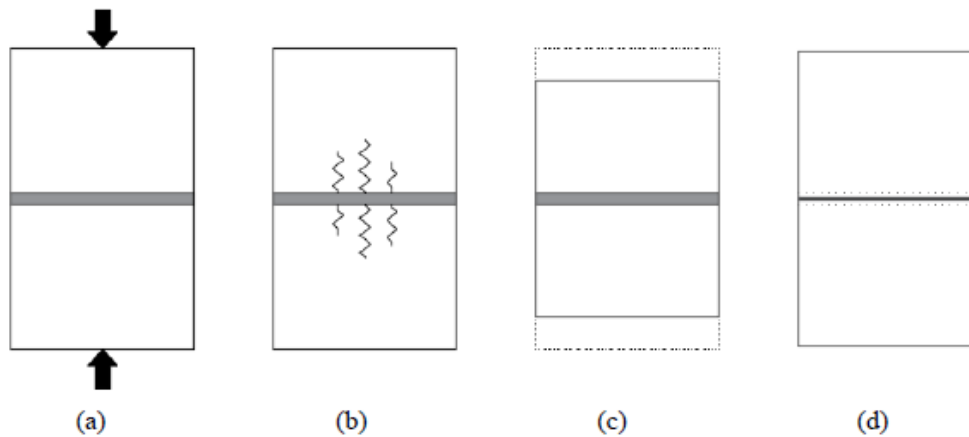


Figura 14 - (a) prisma submetido a compressão axial; (b) ruptura por tração no bloco; (c) ruptura por esmagamento do bloco e (d) ruptura por esmagamento da junta de argamassa.
 Fonte: Adaptado, Cheema e Klingner.

2.5.3 Influência do bloco estrutural no modo de ruptura

As características geométricas, as dimensões e, sobretudo, o tipo de material empregado na fabricação dos blocos utilizados em alvenaria estrutural exercem influência significativa no comportamento mecânico da estrutura quando submetida a esforços de compressão (Santos, 2008).

2.5.3.1 Influência do tipo de material do bloco estrutural

No que se refere ao material constitutivo dos blocos, De Marco (2016) destaca que tanto a resistência à compressão quanto o mecanismo de ruptura diferem substancialmente entre blocos cerâmicos e blocos de concreto. Comparativamente, os blocos cerâmicos apresentam uma faixa de resistência à compressão superior, entretanto, são caracterizados por um comportamento mais frágil no processo de ruptura. Além disso, tais blocos tendem a apresentar fissuras concentradas nas regiões de encontro entre as paredes longitudinais e transversais, bem como um fator de eficiência prisma/bloco inferior.

Por outro lado, os blocos de concreto exibem uma faixa de resistência à compressão inferior, porém com comportamento de ruptura dúctil, associado a um padrão de fissuração mais distribuído ao longo da unidade. Ademais, esse tipo de bloco apresenta maior fator de eficiência prisma/bloco. Do ponto de vista mecânico e visual, a falha estrutural pode ocorrer por indução de tensões de tração no bloco, por esmagamento da junta de assentamento ou ainda por uma combinação desses dois modos de ruptura (LÜBECK, 2016). A tabela 1 sintetiza

as principais distinções entre os blocos cerâmicos e os blocos de concreto quanto às suas propriedades mecânicas e comportamento estrutural.

Tabela 4 - Comparativo de propriedades dos blocos.

| Propriedade | Bloco cerâmico | Bloco de concreto |
|----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Faixa de resistência | Maior | Menor |
| Modo de ruptura | Mais frágil | Mais dúctil |
| Modo de fissuração | Fissuras localizadas | Fissuras distribuídas |
| Fator de eficiência prisma/bloco | Menor | Maior |

Fonte: De Marco (2016) e Lubeck (2016).

2.5.3.2 Influência da geometria do bloco estrutural

Steil (2003) investigou o comportamento mecânico de prismas de blocos de concreto, com o objetivo de analisar a influência da geometria dos blocos em conjunto com diferentes composições de argamassa. O estudo comparou propriedades como fator de eficiência, deformabilidade e distribuição de tensões.

Foram analisadas cinco geometrias distintas de blocos, todas com a mesma resistência nominal, associadas a três tipos de argamassa de assentamento — duas compostas por cimento, cal e areia, e uma industrializada. Por meio de ensaios experimentais e análises via elementos finitos, o autor concluiu que blocos com furos mais cônicos em sua geometria apresentaram fatores de eficiência mais baixos. Além disso, identificou-se que a geometria dos blocos contribuiu para o surgimento de tensões de tração diferenciais em seu interior.

Além dos estudos de Rizzatti (2003) e Steil (2003), outros pesquisadores também confirmam a relação entre a geometria do bloco e o modo de ruptura da alvenaria, como apontado por Nascimento *et al.* (2010) e Thamboo *et al.* (2013).

Nascimento *et al.* (2010), avaliaram a influência da geometria de blocos cerâmicos na resistência mecânica de prismas. Para isso, moldaram prismas com diferentes geometrias de blocos cerâmicos, com resistências nominais de 12 MPa e 15 MPa.

2.6 CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL NA ENGENHARIA CIVIL

Esta seção tem por objetivo apresentar um panorama da utilização da técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC) em diferentes aplicações na área da Engenharia Civil. A revisão da literatura selecionada permite identificar os

principais métodos de implementação, os campos de aplicação recorrentes e os tipos de estruturas ou sistemas nos quais a DIC tem sido adotada como ferramenta de apoio à análise experimental e à caracterização do comportamento mecânico de materiais e componentes estruturais.

Santos *et al.* (2015) investigaram o efeito de escala em estruturas de concreto por meio da técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC), considerando sua influência sobre parâmetros estruturais relevantes, como resistência, fragilidade e ductilidade. Os ensaios experimentais foram realizados em laboratório, utilizando vigas submetidas a carregamento de flexão em três pontos. Para a aplicação da DIC, foram capturadas imagens com o uso de um microscópio USB de alta resolução, equipado com sensor de 2,0 megapixels e sistema de iluminação própria por LEDs. As imagens foram registradas a uma taxa de 5 quadros por segundo, possibilitando o monitoramento detalhado das deformações ao longo do ensaio.

As imagens capturadas foram processadas utilizando o software LabView, com o objetivo de analisar os deslocamentos de translação e rotação dos padrões previamente aplicados. Antes da realização dos ensaios, as vigas foram devidamente polidas e marcadas com uma malha de espaçamento regular, visando otimizar o rastreamento das deformações ao longo do tempo. Os resultados obtidos por meio da técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC) foram comparados com os dados provenientes de ensaios convencionais. Essa comparação permitiu concluir que a DIC é uma ferramenta eficaz para a quantificação de deslocamentos e para a avaliação do efeito de escala sobre a ductilidade estrutural das vigas analisadas, destacando-se por sua natureza não intrusiva e sem necessidade de contato físico com a estrutura.

Le *et al.* (2019) realizaram um estudo voltado à aplicação da técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC) na medição de deformações em estruturas de concreto expostas a altas temperaturas, considerando que a confiabilidade desses dados é essencial para a previsão precisa do comportamento do material em situações extremas. No artigo, os autores apresentam uma revisão crítica dos métodos tradicionais utilizados para mensurar deformações em concretos sob altas temperaturas, apontando suas principais limitações e desafios. Em seguida, propõem um método recentemente desenvolvido baseado na

tecnologia DIC tridimensional (3D DIC), destacando seu potencial em termos de precisão e aplicabilidade em condições severas.

Para a realização deste estudo, foram utilizadas cinco câmeras com resolução de 5 megapixels, equipadas com lentes de 75 mm. As imagens capturadas foram processadas por meio do software VIC-3D, permitindo a extração dos deslocamentos e deformações necessários para a análise.

A fim de garantir a qualidade das imagens obtidas durante os ensaios, foi necessário adotar medidas específicas de controle óptico. Para isso, utilizou-se um filtro de passagem de banda Midopt BP470, com o objetivo de limitar a incidência de radiação térmica nas câmeras. Além disso, foi empregado um filtro de luz azul EFFI-Lase-Power-CM-C02-465, que contribuiu para o aprimoramento da iluminação e, conseqüentemente, para a nitidez dos registros visuais.

A metodologia empregada contou com o uso de painéis radiantes, os quais foram responsáveis por manter condições térmicas controladas e consistentes durante os ensaios. Os testes foram conduzidos em corpos de prova cilíndricos de concreto, previamente preparados com padrões de *speckle* aplicados sobre suas superfícies para viabilizar a análise por Correlação Digital de Imagens (DIC). Os resultados obtidos por meio da DIC foram comparados aos dados registrados por atuadores e extensômetros de deformação ao longo dos ensaios. Essa comparação evidenciou uma boa concordância entre os métodos, demonstrando a confiabilidade da técnica DIC tanto em condições de temperatura ambiente quanto sob altas temperaturas.

Assis *et al.* (2021) desenvolveram uma investigação experimental com o objetivo de elaborar mapas de previsão de fratura por meio da técnica de Correlação de Imagens Digitais bidimensional (DIC 2D), visando a antecipação de fraturas induzidas por compressão axial — um fenômeno de grande relevância para a engenharia estrutural. Foram ensaiados cinco corpos de prova cilíndricos de concreto, com resistência à compressão de 40 MPa, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Durante os ensaios, imagens digitais das superfícies dos corpos foram adquiridas e processadas segundo a metodologia da DIC 2D.

O sistema experimental incluiu um mecanismo de aplicação de carga capaz de induzir deformações significativas por compressão axial. A captura das imagens foi realizada com uma câmera digital Canon EOS 70D equipada com

lente de 18–55 mm, posicionada a uma distância de um metro da amostra, e com o auxílio de iluminação ultravioleta para minimizar a formação de sombras. O processamento das imagens foi conduzido com o software NCORR, que emprega algoritmos de correlação baseados na função de custo de correlação cruzada normalizada. As imagens foram segmentadas em sub-regiões (blocos), permitindo a identificação dos deslocamentos relativos por meio da comparação entre as diferentes configurações adquiridas ao longo do ensaio.

A partir dos dados obtidos, foi possível gerar mapas de deformação com sobreposição nas imagens reais dos corpos de prova, o que possibilitou verificar a correspondência entre as zonas de concentração de tensões e os locais efetivos de ruptura. Os resultados indicaram que, em aproximadamente 67% das amostras, as áreas com maior acúmulo de deformações coincidiram com os pontos de ruptura, demonstrando a efetividade da técnica na previsão do comportamento fraturante e na caracterização da propagação de trincas em elementos de concreto submetidos à compressão.

2.6.1 Correlação de Imagem Digital em Alvenaria

Esta seção explora a aplicação da técnica em distintos sistemas de alvenaria, com ênfase nos procedimentos metodológicos adotados e nos principais resultados obtidos a partir de sua implementação.

Nghiem *et al.* (2014) conduziram uma investigação utilizando a técnica de Correlação de Imagens Digitais (DIC) com o objetivo de desenvolver uma abordagem inovadora para a avaliação de danos em estruturas de alvenaria decorrentes da abertura de juntas. A metodologia empregada permitiu a análise dos deslocamentos dos blocos e a identificação de fissuras localizadas nas proximidades das juntas. Para tanto, foram utilizadas quatro câmeras de alta resolução dispostas em configuração estéreo, possibilitando a medição de deslocamentos em três dimensões. A análise dos dados foi realizada por meio do software VIC-3D, responsável também pela obtenção dos campos de tensão e deformação. Antes da execução dos ensaios, imagens estáticas foram capturadas para quantificação dos erros de medição, considerados posteriormente como erros sistemáticos e levados em conta na avaliação dos danos estruturais.

O estudo adotou um modelo físico em escala reduzida para simular a interação solo-estrutura e a resposta da alvenaria. As imagens foram capturadas por um sistema de câmeras, sendo posteriormente analisadas por meio da técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC). Em uma fase subsequente, os blocos foram reconstruídos e as fissuras identificadas e quantificadas com base nos dados obtidos pela DIC, levando em conta sua localização, comprimento, orientação e largura, em dois modelos de estruturas submetidas a movimentações do solo provocadas por escavações.

Os resultados obtidos foram comparados com indicadores convencionais de avaliação, permitindo uma análise mais precisa e detalhada da localização, comprimento, largura e orientação das fissuras nas estruturas de alvenaria. Essa comparação comprovou a eficácia da aplicação combinada da técnica de Correlação de Imagens Digitais (DIC) com modelos físicos em escala reduzida, demonstrando seu potencial para a compreensão aprofundada do comportamento dessas estruturas sob diferentes condições de carregamento. A utilização da DIC possibilitou a identificação dos padrões de fissuração nas paredes de alvenaria, além de fornecer representações visuais claras dos deslocamentos e deformações observados nas amostras. Adicionalmente, a análise revelou a integridade dos pilares durante os ensaios de carregamento cíclico.

O estudo também apresenta procedimentos detalhados para a aplicação da DIC em ensaios de paredes de alvenaria em escala real, discutindo os fatores que influenciam a precisão das medições — como o tamanho dos subconjuntos e os incrementos utilizados. Esses achados contribuem significativamente para o entendimento dos modos de falha e do desempenho estrutural de paredes de alvenaria não armada, reforçando a confiabilidade da técnica DIC na análise dessas estruturas.

Kumar, Aravind e Hossiney (2019) investigaram o uso da Correlação de Imagens Digitais (DIC) para medir deformações em tijolos de alvenaria, utilizando o programa Ncorr em MATLAB 2D. O estudo comparou a eficácia da DIC com métodos tradicionais, como extensômetros e LVDTs, que realizam medições pontuais. Foi testado um prisma de alvenaria heterogêneo com 520 mm de altura, 220 mm de largura, 100 mm de espessura e resistência média à compressão de 7,65 MPa. As imagens foram capturadas a cada 10 segundos

por uma câmera DSLR de 12 megapixels, com posição fixa e iluminação controlada.

Os dados de deformação obtidos pela DIC foram semelhantes aos dos métodos convencionais, especialmente no momento da ruptura. A técnica demonstrou precisão na identificação dos padrões de falha e na localização dos pontos de deformação extrema, evidenciando seu potencial como ferramenta confiável para análise estrutural em alvenaria.

Stazi *et al.* (2020) empregaram a DIC para avaliar a deformação e o comportamento mecânico de blocos de alvenaria produzidos com solo extrudado. Três câmeras foram posicionadas para captar deslocamentos e deformações em doze amostras submetidas a ensaios de compressão, compressão diagonal e cisalhamento combinado. As superfícies receberam textura para a aplicação da DIC-3D, permitindo a obtenção dos campos de deslocamento e deformação. Os resultados revelaram que, sob compressão, a alvenaria se comportou como colunas independentes, com deslizamentos diferenciais entre elas. A DIC também identificou padrões de falha e forneceu informações detalhadas do comportamento dos blocos, auxiliando no aprimoramento do produto.

2.7 DINÂMICA DAS ESTRUTURAS

O estudo da dinâmica na engenharia teve início no século passado, focalizando inicialmente o comportamento de equipamentos mecânicos por meio de modelos simplificados. Notáveis contribuições foram feitas pelo holandês Jacob Pieter (1901-1989) e pelo croata Stephen Prokofyevich Timoshenko (1878-1972). Com o tempo, essa área de estudo expandiu-se para outras disciplinas relacionadas ao projeto de estruturas. Com o avanço da capacidade de processamento dos computadores, modelos e métodos de análise dinâmica foram refinados, permitindo a simulação precisa do comportamento de estruturas cada vez mais complexas.

As estruturas são sistemas físicos que suportam ações externas e são capazes de transmitir esforços. Estas ações geralmente variam com o tempo, em termos de magnitude, posição, direção e/ou sentido, e são consideradas dinâmicas quando há relevância das forças de inércia. Elas podem surgir de atividades humanas, como correr e pular, de equipamentos móveis, como

veículos, ou de partes móveis, como vibradores, compactadores e turbinas, além de serem causadas por fenômenos naturais, como vento, explosões, ondas marítimas e terremotos. Essas atividades resultam em vibrações nas estruturas, as quais podem implicar em danos e fadiga dos materiais, afetando o conforto dos usuários (Soriano, 2014).

Portanto, no projeto de estruturas, é crucial descrever matematicamente as ações externas dinâmicas e avaliar a relevância das oscilações resultantes para controlá-las. Esse estudo é conhecido como Dinâmica das Estruturas e é fundamental para engenheiros que atuam em projetos estruturais.

De acordo com Soriano (2014), as ações externas dinâmicas podem ser modeladas como determinísticas (definidas analítica ou numericamente ao longo do tempo) ou aleatórias. Com essas abordagens, os métodos de análise dinâmica são classificados como determinísticos ou probabilísticos. Por meio dos métodos determinísticos, que definem as ações dinâmicas, é possível obter o comportamento temporal da estrutura. Já com os métodos probabilísticos, utilizando informações estatísticas dessas ações, são determinadas as características probabilísticas desse comportamento.

A Figura 15 mostra um exemplo de carregamento determinístico periódico.

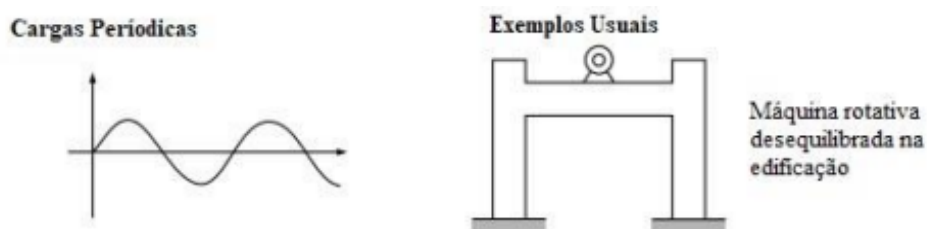


Figura 15 - Carregamento determinístico periódico.
Fonte: Adaptado, Clough e Penzien (2003).

Diferente da figura anterior, a Figura 16 mostra um carregamento determinístico não-periódico.



Figura 16 - Carregamento determinístico não-periódico.
 Fonte: Adaptado, Clough e Penzien (2003).

2.7.1 Conceitos da dinâmica

A vibração é definida como o movimento repetitivo de um corpo ou sistema de corpos unidos em torno de um ponto de equilíbrio. Pode-se classificar a vibração em dois grupos: vibração livre e vibração forçada. Para Hibbeler (2009), a vibração livre ocorre quando o movimento é mantido devido à força da gravidade ou forças elásticas, como um pêndulo oscilando ou uma barra elástica vibrando, sem causar danos estruturais. Porém, a vibração forçada é gerada por uma força externa aplicada ao sistema, como a vibração induzida por uma máquina. Se não for devidamente amortecida, essa vibração pode resultar em danos estruturais significativos.

Amplitude é a distância máxima que um corpo atinge em relação ao seu ponto de equilíbrio após experimentar uma vibração. O período (τ) é definido como a distância entre dois comprimentos máximos de onda e é expresso em segundos. A frequência (f) é o número de períodos por segundo e é medida em *Hertz (Hz)*. A frequência natural é o limite imposto por um sistema para as cargas dinâmicas; se essas cargas vibrarem em uma frequência próxima à frequência natural, o sistema pode ser comprometido. O amortecimento é uma forma de evitar que a estrutura seja afetada por forças externas.

A ressonância é um fenômeno significativo que pode ocorrer em qualquer objeto suscetível à vibração. A interação entre a frequência de uma força externa pode desencadear este fenômeno. Quando a frequência da força externa coincide com a frequência natural de vibração do objeto, podem induzir vibrações de grande amplitude.

Um exemplo muito reconhecido para o fenômeno elucidado anteriormente é a queda da ponte de Tacoma em 1940. A razão para o colapso da ponte foi a ocorrência de ventos laterais que induziram oscilações laterais de torção na estrutura. Essas oscilações tinham frequência próxima à frequência natural da

ponte, resultando em aumento progressivo da amplitude das oscilações. Como resultado, a ponte entrou em ressonância, indo à ruptura devido à fadiga (Gaspar, 2021).

2.7.2 Cargas dinâmicas

As cargas dinâmicas introduzem um componente temporal na análise das estruturas, ao contrário das cargas estáticas, que permanecem constantes. A análise dinâmica de uma estrutura é caracterizada pela consideração de cargas, reações, esforços internos, tensões, deslocamentos e deformações que variam ao longo do tempo, com velocidades não negligenciáveis (Anil, 2014).

A investigação das vibrações em estruturas assume importância crescente, sendo fundamental para compreender o comportamento das edificações em diversas condições operacionais. Estas condições podem estar relacionadas a possibilidade de danos estruturais significativos, que podem levar ao colapso, ou ligado ao Estado Limite de Utilização, garantindo, assim, os limites estabelecidos para evitar vibrações excessivas, e assegurando o bom desempenho da estrutura em serviço.

A análise modal é uma forma de caracterizar o comportamento vibratório da estrutura por meio de suas frequências naturais e modos próprios. Embora não forneça diretamente as amplitudes, ela é essencial para análises dinâmicas subsequentes, como a vibração aleatória.

Quando a frequência de excitação externa se aproxima de uma das frequências naturais, ocorre o fenômeno da ressonância, aumentando significativamente a amplitude da resposta. Essa resposta depende da projeção da força excitadora nos modos próprios e dos parâmetros modais, como rigidez, massa e amortecimento.

Assim, a análise modal permite identificar os modos mais suscetíveis à excitação e serve de base para estimativas de deslocamento e tensão. O modo fundamental (modo 1) geralmente domina a resposta dinâmica da estrutura. A Figura 17 mostra os modos de vibração (senoides).

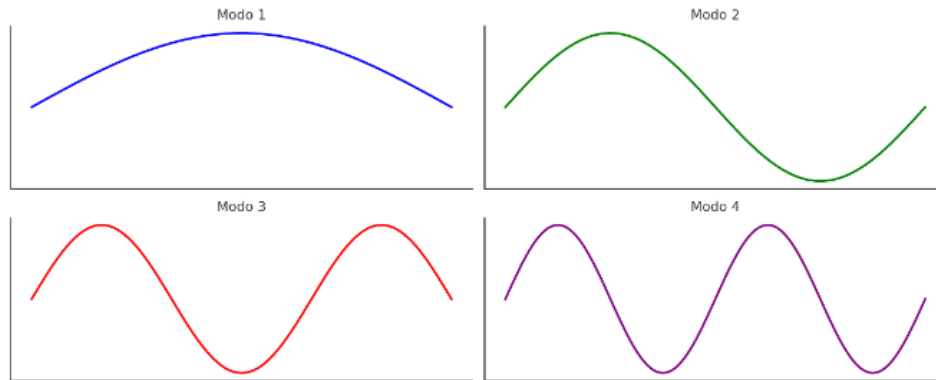


Figura 17 - Forma simplificada dos modos de vibração.
 Fonte: Funções do tipo $\sin(n\pi x)$ - Python.

2.7.2.1 Ações atuantes

Existem várias fontes de cargas dinâmicas em estruturas. Por isso, realizar o estudo de variáveis cargas se mostra necessário e importante para a atual pesquisa, além de conhecer cada grandeza e fenômeno atuante na estrutura que recebe estes esforços.

As vibrações sísmicas (terremotos), vibrações causadas por máquinas, ventos e atividades humanas são cargas dinâmicas aplicadas de forma rápida, gerando acelerações apreciáveis, que só podem ser consideradas com base em uma análise dinâmica. Esses fenômenos podem causar deslocamentos horizontais em qualquer tipo de estrutura, inclusive em estruturas de alvenaria, podendo sofrer deformações permanentes ou elásticas.

A deformação plástica ou permanente resulta em uma deformação irreversível, diferente da deformação elástica, na qual o material retorna à sua forma original quando a carga é removida. Materiais como metais, polímeros e blocos cerâmicos podem exibir este tipo de deformação.

2.7.2.2 Estudos de cargas dinâmicas em alvenaria estrutural

A crescente tendência de projetar estruturas cada vez mais esbeltas e flexíveis pode resultar em redução de suas frequências naturais, tornando-as mais vulneráveis aos carregamentos dinâmicos, porque, suas frequências naturais podem se aproximar das frequências de excitação. Portanto, torna-se essencial verificar o comportamento dinâmico das estruturas e descrever as cargas dinâmicas que atuam sobre elas. Atualmente, diversas pesquisas estão

sendo conduzidas globalmente para examinar as propriedades e o desempenho de novos produtos para alvenaria estrutural, abordando o comportamento desses produtos e outras questões relevantes.

Vargas (2022) apresenta um estudo experimental que visa compreender o efeito das aberturas na resposta sísmica de paredes de alvenaria armada parcialmente grauteadas. Para tanto, quatro paredes em escala real com diferentes tamanhos de abertura foram construídas e testadas sob a ação combinada de compressão axial constante e carregamento lateral cíclico. Todos os corpos de prova tinham as mesmas dimensões externas. O efeito das aberturas foi avaliado por meio de curvas força-deslocamento e a quantificação de diferentes parâmetros sísmicos, tais como capacidade de cisalhamento, diminuição da rigidez lateral, energia dissipada, relação de amortecimento viscoso equivalente e ductilidade de deslocamento. Um sistema de Correlação de Imagens Digitais 2D (DIC) foi implementado para monitorar os principais campos de deformação e padrões de fissuração durante os testes.

Senthil e Ankush (2023) realizaram análises experimentais em sete paredes sob carga de impacto de baixa velocidade. A carga de impacto foi lateral e se utilizou um impactador de 60kg. A resposta das paredes foi medida em termos de força de contato, deslocamentos residuais, padrões de falha e dissipação de energia, sendo utilizados extensômetros para medir algumas grandezas.

Senthil (2022) realizou um estudo com o propósito de estimar a resposta ao impacto de múltiplos golpes em paredes de alvenaria de tijolos cerâmicos, sujeitas a baixa velocidade e elevada carga de massa. O experimento e as simulações foram conduzidos visando prever o comportamento dessas paredes frente a impactos repetidos. Os testes foram conduzidos utilizando uma estrutura de pêndulo com capacidade de 250 kN, e a resposta foi registrada utilizando uma célula de carga dinâmica e um sistema de registro de dados de alta frequência. A resposta de uma parede de alvenaria de tijolo cerâmico com 110 mm de espessura foi analisada sob a ação de uma massa de 60 kg com formato hemisférico. Os corpos de prova foram submetidos a cargas repetidas de mesma magnitude e direção até a ruptura. Observou-se que a resistência da parede permaneceu constante até o sétimo impacto, porém a primeira fissura surgiu na junta do leito da sexta fiada, a partir do topo, no terceiro impacto. Constatou-se

que as paredes de alvenaria mantiveram a mesma resistência até o sétimo impacto, contudo, o dano aumentou com o incremento do número de impactos, culminando em falha completa no 11º impacto.

Gatta e Vestroni (2021) analisaram a resposta estrutural de três paredes de alvenaria a cargas monotônicas e cíclicas. O objetivo foi identificar parâmetros do modelo para que possa ser representado de forma confiável fenômenos degradantes em relação a outros modelos amplamente utilizados com forças restauradoras invariantes. As estruturas foram testadas sob históricos de aceleração de base harmônica em uma mesa vibratória unidirecional e a altura (H) de cada parede foi de 2280 mm. Uma vez colocada cada parede na mesa vibratória, foram realizados testes de identificação dinâmica para determinar as frequências naturais das vibrações flexurais de pequena amplitude associadas aos modos fora do plano.

Trevor (2014) propôs uma metodologia para quantificar a capacidade das paredes de alvenaria armada sob carregamento sísmico, empregando análises dinâmicas não lineares e considerando o comportamento histórico observado. Com isso, foram utilizados dados experimentais, a fim de validar os modelos propostos e desenvolver critérios para a avaliação da deformação e o desempenho dos materiais, assegurando margens de segurança adequadas.

Hung-Liang e Surendra (1986) investigaram a diferença na resposta estrutural de colunas de alvenaria quando a força de cisalhamento no plano é aplicada de forma dinâmica e lenta. Os resultados experimentais foram relatados para o comportamento de dois pilares de alvenaria de tijolo sob agitação dinâmica e carregamento cíclico aplicado lentamente, sendo estes pilares construídos com tijolo e argamassa, composto de areia fina, cal e cimento. Verificou-se que os pilares sob carga dinâmica foram caracterizados por ruptura localizada e degradação abrupta da rigidez. No entanto, a força máxima foi menor sob carga dinâmica.

Partene *et al.* (2015) conduziram um experimento para analisar o desempenho de paredes de alvenaria estrutural cerâmica sujeitas a cargas verticais constantes e cargas horizontais cíclicas. O estudo visava determinar a capacidade de cisalhamento de paredes de alvenaria não reforçadas e reforçadas. Os blocos cerâmicos utilizados apresentavam dimensões de (37,5 cm x 25,0 cm x 23,8 cm), com área líquida correspondente a 52% da área bruta

da seção. As propriedades dos blocos cerâmicos foram medidas como 0,14 MPa para resistência à tração, 3,98 MPa para resistência à compressão e 2350 MPa para o módulo de elasticidade longitudinal. Os resultados revelaram aumento de até 76% na resistência mecânica quando foram empregados reforços nas paredes de alvenaria, demonstrando que o reforço melhora o desempenho sob cargas verticais e horizontais.

Moraes *et al.* (2019) examinaram a viabilidade de um sistema passivo de controle de vibrações por meio da utilização de materiais inteligentes, como minimolas de liga com memória de forma (LMF) em seu estado de superelasticidade. Realizaram-se experimentos dinâmicos para validar esse método em um pórtico de dois graus de liberdade (2GDL), integrando fios de aço às minimolas LMF. O intuito era ampliar o amortecimento estrutural e diminuir a transmissão de deslocamentos do sistema. Os resultados apontam que a inclusão desses componentes pode efetivamente mitigar vibrações em estruturas sujeitas a estímulos dinâmicos.

Alva (2021) realizou análises sísmicas em um edifício de concreto armado com paredes de alvenaria. Utilizou-se o método da NBR 15421 (ABNT, 2006) para calcular as cargas sísmicas laterais. O modelo de bielas diagonais equivalentes foi aplicado para simular a rigidez axial das paredes de alvenaria nas aberturas, utilizando diferentes formulações da literatura. O principal objetivo foi avaliar as discrepâncias resultantes das diversas formulações para a escora equivalente na resposta sísmica. Além disso, comparou-se os resultados quando a rigidez da alvenaria não foi considerada sob cargas sísmicas.

Girardi *et al.* (2016) utilizaram o código NOSAITACA 1.2, que possibilitou a análise de estruturas de alvenaria considerando não linearidades materiais e fissuras induzidas por cargas. Utilizando um modelo “*masonry-like*”, o método calcula frequências naturais e modos de vibração a partir da matriz de rigidez tangente obtida no equilíbrio não linear, incorporando os efeitos da danificação estrutural. A aplicação em estudos de caso, incluindo a torre sineira de San Frediano (Itália), demonstrou que a consideração da fissuração e do estado de tensões proporciona estimativas mais precisas das propriedades dinâmicas, evidenciando a importância de modelos não lineares na avaliação de estruturas históricas. A Figura 18 mostra os resultados encontrados para a frequência de acordo com a aplicação em quatro pontos da estrutura.

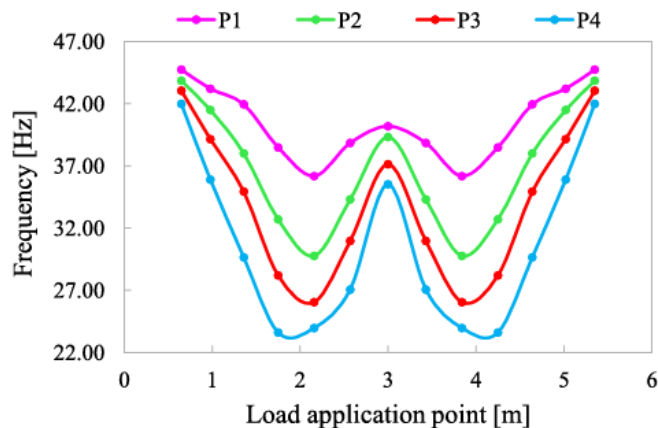


Figura 18 - Pontos de aplicação de cargas e sua frequência.
Fonte: Girardi et al. (2016).

2.8 MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica, fundamentada no Método dos Elementos Finitos (MEF), permite determinar os estados de tensão e deformação em sólidos de geometria complexa submetidos a carregamentos externos. Na Engenharia Estrutural, essa abordagem é amplamente empregada na análise e verificação de diferentes tipos de construções. Durante o processo de projeto, o MEF possibilita sucessivas avaliações e ajustes, contribuindo para soluções estruturais mais eficientes, duráveis e compatíveis com os requisitos normativos.

Conforme destacado por Chandrupatla e Belegundu (2012), o (MEF) representa uma ferramenta extremamente eficaz na resolução de uma ampla variedade de problemas em engenharia. Com os avanços na capacidade de processamento computacional e a integração com sistemas de modelagem assistida por computador (CAD), tornou-se possível modelar e analisar sistemas complexos com maior precisão e agilidade. Essa evolução tecnológica permite a simulação de diferentes configurações estruturais ainda na etapa de projeto, promovendo uma compreensão mais profunda do comportamento mecânico dos componentes e reduzindo a necessidade de prototipagem física. Dessa forma, o método dos elementos finitos tem se consolidado como uma etapa essencial no desenvolvimento e na verificação de soluções estruturais mais seguras e eficientes.

Antes da inserção e utilização do (MEF), a análise de meios contínuos implicava em resolver diretamente sistemas de equações diferenciais parciais, considerando as condições de contorno. Para viabilizar a solução desses

problemas, especialmente em geometrias e condições mais complexas, era comum o uso de séries de Fourier e métodos analíticos clássicos (Zienkiewicz e Taylor, 2005).

Com o progresso tecnológico, a disponibilidade de computadores poderosos e o desenvolvimento de *softwares* robustos, a modelagem numérica de estruturas se estabeleceu como ferramenta essencial para auxiliar em pesquisas e projetos estruturais. Sua aplicação permite uma compreensão mais aprofundada do comportamento mecânico, da distribuição de esforços e dos potenciais mecanismos que levam à falha e ao colapso das estruturas. Os métodos numéricos podem ser utilizados para validar os resultados de testes experimentais ou para evitar a necessidade de se realizar tais testes, especialmente os destrutivos, antecipando, portanto, o comportamento de uma estrutura específica ou de um material.

2.8.1 Modelagem numérica em alvenaria estrutural

A NBR 15270-1 (ABNT, 2023), estipula diretrizes para a modelagem por elementos finitos, enfatizando a importância de uma discretização adequada da estrutura para evitar imprecisões na análise. Destaca-se que o modelo deve reproduzir com precisão a geometria, os carregamentos, as condições de contorno e as propriedades dos materiais para a análise em questão.

Portanto, a única restrição imposta pela norma à modelagem por elementos finitos é a prevenção de erros significativos decorrentes de uma malha inadequada ao projeto, assegurando que o modelo se assemelhe às condições impostas à estrutura. Além disso, a NBR 15270-1 (ABNT, 2023), menciona que o comportamento dos materiais pode ser representado de várias maneiras, incluindo análises linear, linear com redistribuição, plástica e não linear.

De acordo com Lourenço (1996), existem duas principais abordagens de modelagem para simular numericamente uma alvenaria: a macromodelagem e a micromodelagem. Na macromodelagem, não se leva em consideração a diferença de comportamento entre as juntas de argamassa e os blocos, utilizando-se uma lei constitutiva que descreve o comportamento do material como um todo. Por outro lado, a micromodelagem envolve a modelagem separada das juntas, blocos e até mesmo interfaces, com o objetivo de simular

o comportamento do material a nível das juntas, sendo empregadas no estudo de pequenas regiões da alvenaria, visando simular os efeitos localizados. Na Figura 19 apresentam-se os componentes da alvenaria.

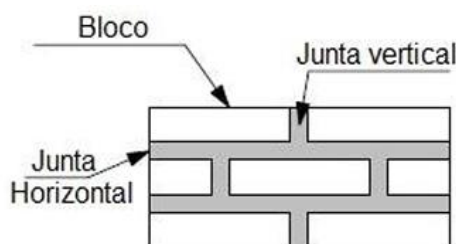


Figura 19 - Exemplo dos componentes da alvenaria.
Fonte: Adaptado, Lourenço (1996, p. 12).

Na Figura 20 (a) é ilustrada a micromodelagem detalhada, na qual as unidades e as argamassas são representadas por elementos contínuos, enquanto a interface (área de adesão entre bloco/argamassa) é representada por elementos descontínuos. Nesse contexto, as características físicas da unidade e da argamassa, como o coeficiente de Poisson, o módulo de elasticidade e as propriedades não lineares, são consideradas (Lourenço, 1996). Na representação da Figura 20 (b), encontra-se a micromodelagem simplificada, na qual as unidades são representadas por elementos contínuos, com dimensões expandidas, e o comportamento das juntas e da interface é considerado descontínuo. Nesse caso, há uma perda de precisão devido à desconsideração do efeito de Poisson na argamassa. A micromodelagem é recomendada para prever o comportamento da estrutura, como a distribuição de tensões em aberturas de portas e janelas.

Por fim, a macromodelagem é representada na Figura 20 (c), onde a unidade, a argamassa e a interface são consideradas dispersas no meio contínuo, tratando a alvenaria como um meio homogêneo com propriedades uniformes. Esse método é aplicável quando a estrutura é composta por paredes sólidas com dimensões grandes o suficiente para que as tensões possam ser consideradas uniformes (Lourenço, 1996).

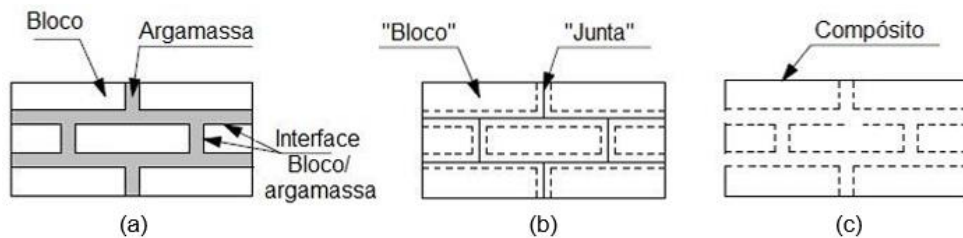


Figura 20 - Estratégias de modelagem, (a) micromodelagem detalhada, (b) micromodelagem simplificada e (c) macromodelagem.

Fonte: Adaptado, Lourenço (1996, p. 12).

2.8.2 Estudos utilizando análise numérica

A análise numérica desempenha um papel relevante no projeto de estruturas de alvenaria, fornecendo aos engenheiros as ferramentas necessárias para projetar estruturas seguras, eficientes e economicamente viáveis, além de identificar parâmetros de uma estrutura e regiões críticas que estão sofrendo maiores ações de cargas estáticas e dinâmicas.

Furukawa e Kiyono (2023) criaram um modelo analítico utilizando o Método dos Elementos Discretos (DEM), que considera a aplicação de um peso de 70 kg no topo de cada parede de alvenaria e adota um amortecimento em alguns pontos da base da estrutura, proporcional à massa e com uma constante definida como 0,03 para o modo de vibração. A aceleração de entrada foi definida como três ciclos de uma onda senoidal com amplitude de 2.000 e frequência de 11,328 Hz, com base na frequência natural do primeiro modo, determinada pela análise dinâmica da vibração livre. A ruptura do tijolo ocorre na extremidade do elemento, enquanto a ruptura da argamassa ocorre entre os tijolos.

Asad, Zahra e Thamboo (2021) analisaram estruturas de alvenaria sob ações sísmicas dinâmicas. Para isso, desenvolveram técnicas de modelagem numérica apropriadas, levando em conta o carregamento cíclico. O modelo numérico foi desenvolvido para analisar diferentes espessuras de alvenaria submetida à compressão cíclica. Cada tijolo da alvenaria foi definido usando elementos sólidos 3D com 8 nós e 24 graus de liberdade, representando um tijolo ampliado composto por um tijolo em escala real envolto por meia espessura da camada de argamassa em toda a volta. Esses tijolos da alvenaria foram dispostos em múltiplas camadas usando elementos de interface coesivos de espessura zero para simular o comportamento da ligação sob ações de cisalhamento, tração e compressão.

Garcia (2000) desenvolveu uma investigação numérica por meio do software ANSYS, utilizando elementos finitos bidimensionais, com o objetivo de simular o comportamento estrutural de paredes cerâmicas. No referido estudo, foram elaborados modelos representando quatro diferentes configurações de paredes, considerando-se restrições nodais de deslocamento nas direções X e Y aplicadas à base das estruturas. As Figuras 21 e 22 ilustram as geometrias modeladas apenas da parede 1, sendo sua condição de contorno restringido o movimento apenas na base da estrutura.

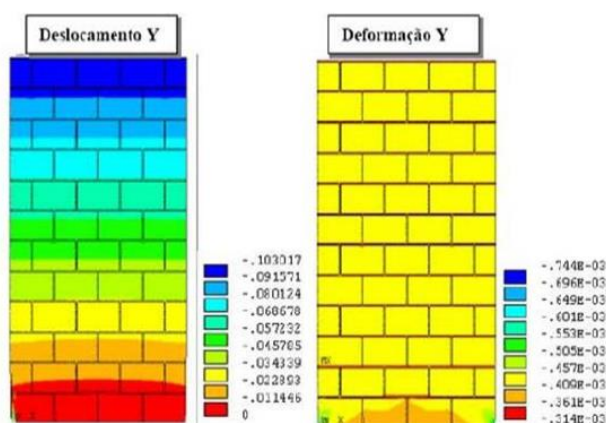


Figura 21 - Deslocamento e deformação em Y.

Fonte: Garcia (2000).

Observou-se que os deslocamentos foram mais pronunciados na região superior da parede, apresentando uma redução progressiva em direção à base, comportamento condizente com o regime de deformação esperado para esse tipo de estrutura. Para Garcia (2000), houve também a identificação de concentrações de tensões localizadas nas juntas verticais preenchidas com argamassa. Tal fenômeno é atribuído à diferença de rigidez entre os materiais constituintes, sendo a argamassa consideravelmente mais rígida do que os blocos cerâmicos adjacentes.

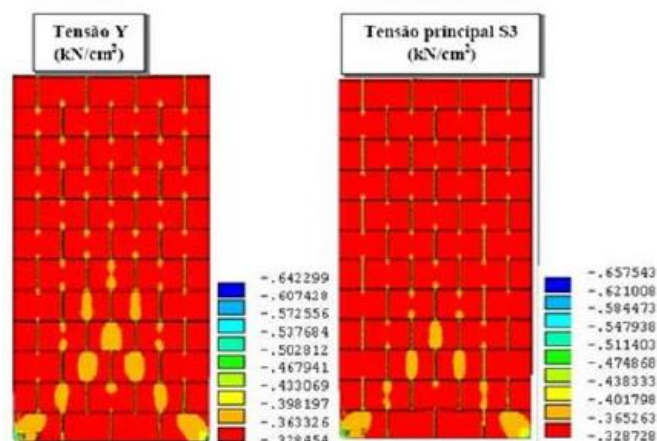


Figura 22 - Tensões.
 Fonte: Garcia (2000).

Demir (2023), avaliou a vulnerabilidade sísmica por meio da macromodelagem de um edifício histórico de alvenaria, localizado em Bergama, Izmir, Turquia, utilizando, o *software* ANSYS. A sismicidade na sua localização foi determinada e a resposta estrutural sob cargas laterais obtida juntamente com as características dinâmicas.

Senthil (2022) também realizou simulações numéricas utilizando o *software* ABAQUS, e os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais correspondentes. Experimentalmente estimou-se a resposta ao multi-impacto de paredes de alvenaria de tijolos cerâmicos sob baixa velocidade e grande carga de massa. O comportamento de dano da parede de alvenaria foi modelado por meio da lei de tração-separação, ambas prontamente disponíveis na biblioteca de materiais do ABAQUS. Esse modelo foi implementado para representar o comportamento de endurecimento e a interação entre os tijolos e a argamassa. Os resultados numéricos foram então validados em termos de histórico de força e deslocamento em relação aos resultados experimentais. De maneira geral, os resultados numéricos previstos apresentaram uma boa concordância com os resultados experimentais.

Huang *et al.* (2021) analisaram paredes de casas com estrutura de alvenaria. Para isso, utilizaram o ABAQUS para projetar os modelos de parede, e adotaram um tipo de carga periódica horizontal com diferentes magnitudes para calcular o desempenho mecânico da parede, e, estudaram as características de mudança de tensão e o desenvolvimento de fissuras da

parede. O modelo de carregamento adotado simulou o impacto de terremotos e outras cargas dinâmicas na parede.

Portioli e Cascini (2015) adotaram uma formulação variacional simples para analisar a dinâmica de estruturas de blocos de alvenaria sob eventos sísmicos. O modelo consistiu na montagem bidimensional de blocos rígidos que interagem em pontos de contato potenciais localizados nos vértices das interfaces. O problema de contato dinâmico foi formulado como um problema de programação quadrática, e um procedimento iterativo foi implementado para a integração no tempo, sendo apresentadas aplicações a estudos de caso analíticos e numéricos para validação.

Mendola, Papia e Zingone (1995) analisaram a condição de estabilidade de paredes de alvenaria com extremidades fixas e livres, submetidas a forças transversais sísmicas. A solução foi alcançada numericamente com o pilar dividido em um número suficientemente elevado de elementos, cada um com curvatura uniforme.

Lafuente e Cruz (1996) utilizaram um índice de dano baseado na degradação da rigidez para a caracterização da deterioração em paredes de alvenaria confinadas submetidas a carregamentos cíclicos laterais. O índice de danos variou de acordo com o nível de deformação da parede. Uma metodologia simplificada foi apresentada para estimar o comportamento destas paredes. Foi feita a utilização do parâmetro de força e massa, ajustados por meio de dados experimentais disponíveis para aproximar a rigidez lateral a cada ciclo de carga.

Zhugue *et al.* (1998) desenvolveram um modelo analítico para estudar a resposta da alvenaria não reforçada a cargas dinâmicas. A análise foi implementada em um programa não linear de elementos finitos, no qual a alvenaria foi tratada como material ortotrópico homogêneo não linear. A análise dinâmica não linear foi realizada usando o esquema de iteração Newton-Raphson modificado em conjunto com o algoritmo de integração temporal Newmark.

Santhi (2018) avaliou o desempenho sísmico de um edifício de concreto armado com alvenaria contendo 9 andares por meio de análises dinâmicas lineares e não lineares. A análise foi realizada utilizando o *software* de elementos finitos chamado ETABS. Foram estudados três modelos de pórticos, nomeadamente, pórtico nu, pórtico totalmente preenchido e pórtico macio, para

compreender a resistência à carga lateral dos pórticos. As características dinâmicas dos pórticos, como período, frequência, modos de vida, deslocamentos entre andares e capacidade de dissipação de energia foram avaliados e comparados.

Nasser (2001) desenvolveu um modelo de elementos finitos cuja validade foi verificada utilizando-se três modelos físicos para estimar os pares próprios de estruturas de alvenaria localizadas na primeira catarata do Nilo. Modelos em escala física foram projetados, fabricados e analisados dinamicamente, usando elementos finitos e um analisador de sinal de canal duplo equipado com *software* de análise modal para validação e verificação do modelo.

Adessi *et al.* (2015) investigaram a resposta estática e dinâmica não linear de elementos estruturais de alvenaria bidimensionais simples, considerando uma parede esbelta e uma parede de pequeno porte. Para isso adotaram um modelo de dano isotrópico não localizado e implementado em elementos finitos bidimensionais com nove nós para realizar as análises numéricas. A carga limite e do comportamento pós-pico das estruturas, foram avaliados e comparados com os resultados experimentais. Com o objetivo de analisar a influência da evolução do mecanismo de dano na resposta dinâmica de estruturas de alvenaria, curvas de resposta em frequência da parede esbelta submetida a processos degradantes foram avaliadas e comparadas com a resposta elástica. Finalmente, a resposta dinâmica da parede esbelta aos terremotos naturais foi calculada para apontar a influência dos danos.

Oliveira e Lourenço (2004) desenvolveram um modelo bidimensional para simular a resposta da alvenaria a cargas cíclicas, empregando elementos de interface entre as unidades de alvenaria.

Chen *et al.* (2009) investigaram o impacto da variação das cargas verticais no desempenho de edifícios de alvenaria de vários andares por meio de simulação numérica, utilizando o *software* ANSYS.

Lemos (2019) utilizou o Método de Elementos Discretos, a fim de analisar um modelo simplificado de blocos, com limitações na representação de danos e detalhes construtivos. Apesar da possibilidade de refinamentos, faltou dados adequados para tal. Além disso, os testes estáticos não reproduziram corretamente as frequências naturais observadas, tornando essencial a

calibração do modelo com base nos valores experimentais para melhorar seu desempenho dinâmico. A Figura 23 mostra o modelo de parede utilizada pelo autor, sua condição de contorno mostra travamentos na base e nas laterais, restringindo seu movimento em x e y.

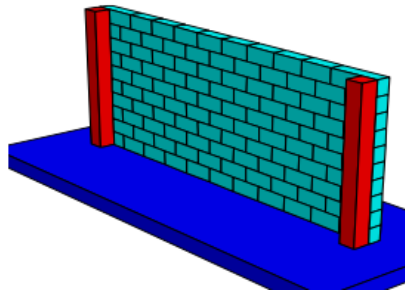


Figura 23 - Modelo de parede em alvenaria.
Fonte: Lemos (2019).

Lemos (2019) concluiu que modelos de elementos discretos foram eficazes na análise de alvenaria, especialmente sob cargas sísmicas, por representarem com precisão os modos de falha. Contudo, sua aplicação prática exige validação com testes experimentais e terremotos reais. Devido à falta de dados em construções existentes, simplificações no modelo são necessárias.

CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e as metodologias que foram utilizadas na pesquisa para alcançar os resultados esperados. O desenvolvimento deste estudo conta com um programa composto por duas etapas: ensaios experimentais realizados em laboratório e desenvolvimento de modelagem numérica utilizando o Software *Ansys*.

O procedimento experimental desta pesquisa foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), em Campos dos Goytacazes - RJ, Brasil.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS

Como matéria-prima principal para a realização deste estudo, foram utilizados blocos cerâmicos extrudados, prensados e queimados (BCEPQ), obtidos na Cerâmica Sardinha, localizada na região de São Sebastião, distrito de Campos dos Goytacazes, estado do Rio de Janeiro, Brasil.

Os blocos de alvenaria estrutural foram utilizados para a construção dos prismas e pequenas paredes analisadas no decorrer desta pesquisa.

3.1.1 Propriedades geométricas

As dimensões geométricas foram analisadas em blocos inteiros e meios-blocos selecionados aleatoriamente do lote, conforme as especificações normativas. Os blocos inteiros após medições, apresentaram medidas de 28 cm de comprimento, 14 cm de largura e 6 cm de altura. Já os meios-blocos possuíam aproximadamente 14 cm de comprimento — valor reduzido devido ao corte realizado com serra mármore, o que ocasiona a perda de alguns milímetros no processo — mantendo, contudo, a largura de 14 cm e a altura de 6 cm.

Para a realização da medição foram utilizados 13 blocos, e a instrumentação utilizada foi um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, garantindo a precisão na obtenção das dimensões em três pontos distintos de cada face, considerando largura, altura e comprimento dos blocos e meios-blocos complementarmente, para verificações adicionais utilizou-se um escalímetro.

A norma NBR 15270-2 (ABNT, 2023) estabelece as especificações dimensionais para blocos estruturais, visando evitar a reprovação de lotes que apresentem variações significativas em relação às dimensões padrão previamente definidas. As dimensões dos blocos cerâmicos foram medidas e utilizadas nesta pesquisa, a Figura 24 detalha cada medida da interface do bloco.

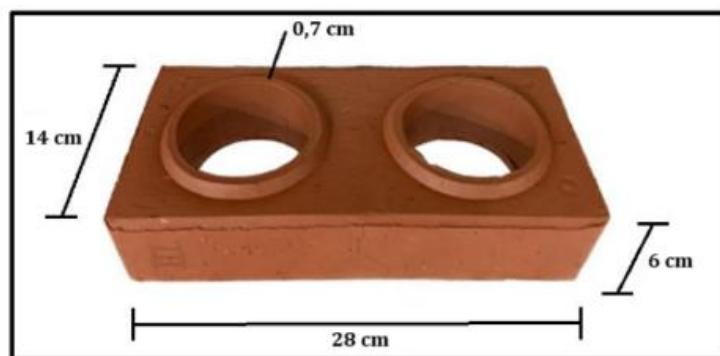


Figura 24 - Dimensões do BCEPQ.

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Propriedades físicas

As propriedades físicas dos blocos cerâmicos analisados neste estudo foram determinadas por meio da realização de ensaios específicos, conforme normas técnicas vigentes. Dentre os principais ensaios realizados, destacam-se o ensaio de índice de absorção de água total (AA), que avalia a capacidade do material em absorver água quando completamente submerso, e o índice de absorção de água inicial (AAI), o qual mede a velocidade com que o bloco absorve a água nos primeiros minutos de contato.

3.1.2.1 Índice de absorção d'água (AA)

A norma NBR 15270-2 (ABNT, 2023) estipula que o ensaio de Índice de Absorção de Água (AA) é essencial para a avaliação da conformidade. Esta norma descreve os métodos para determinar as características físicas, incluindo o cálculo do índice de absorção d'água (AA). Este estudo segue os procedimentos descritos na referida norma, os quais é detalhado na Figura 25, na qual os blocos podem ser vistos em uma estufa para determinar a massa seca (a) e imersos em água (b) para determinar a massa úmida (c).

Os autores Chih-Huang et al. (1998) destacam a importância de se avaliar a absorção de água como forma de estimar a durabilidade das peças cerâmicas.

Quanto menor for a penetração de água, maior será a resistência e a vida útil do material frente às condições ambientais. Dessa forma, é fundamental que a estrutura interna do tijolo apresente uma superfície capaz de impedir a entrada de água.

O índice de absorção d'água (AA) é expresso pela equação 1.

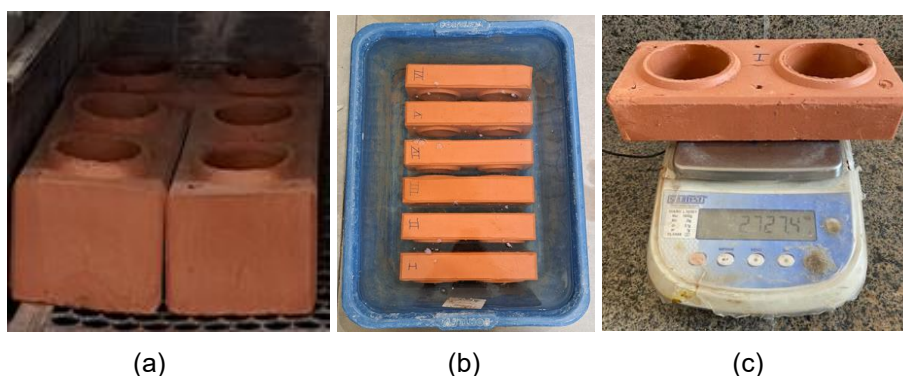
$$AA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

AA: absorção de água expressa em porcentagens (%);

m_u é a massa úmida ou massa saturada do corpo de prova, após imersão por um tempo determinado, em gramas (g);

m_s é a massa seca do corpo de prova, expressa em gramas.



(a) (b) (c)
Figura 25 - Procedimentos do ensaio de absorção d'água.
Fonte: Autoria própria.

3.1.2.2 Índice de absorção d'água inicial (AAI)

Assim como ensaio de Índice de Absorção d'água (AA), o ensaio de Índice de Absorção d'água Inicial também é regido pela NBR 15270-2 (2023). A Figura 26 mostra o método de ensaio dos blocos e a equação que define o AAI é apresentada a seguir, na Equação 2.

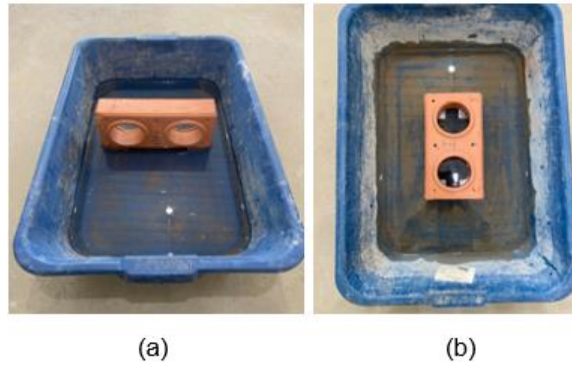


Figura 26 - Procedimentos do ensaio de absorção d'água inicial.
Fonte: Autoria própria.

Ao contrário da AA, conforme mostra a Figura 26, é necessário apenas que seja submersa a área lateral da amostra. Após isso, a amostra é pesada e sua absorção d'água inicial é calculada pela Equação 2.

$$AAI = 194 \times \frac{\Delta_p}{A} \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

AAI: é o índice de absorção d'água inicial da face ensaiada do bloco, expresso em $(g/194^2)/\text{min}$;

Δ_p : é a variação de massa obtida no ensaio, expressa em gramas (g);

A: é a área da face ensaiada dos blocos, expressa em centímetros quadrados (cm^2).

3.1.2.3 Massa específica aparente

A massa específica aparente (MEA) foi determinada com base nos procedimentos estabelecidos pela NBR 15270-1 (ABNT, 2023), utilizando a razão entre a massa seca do corpo de prova e seu volume aparente. A MEA dos blocos de cerâmica vermelha, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3), é calculada de acordo com a Equação 3. Este parâmetro é fundamental para caracterizar a densidade do material e influencia diretamente seu desempenho mecânico, térmico e acústico.

$$MEA = \frac{m_s}{V_a} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

m_s : massa seca do corpo de prova, expressa em gramas (g);

V_a : volume aparente do corpo de prova, expresso em centímetros cúbicos (cm^3).

3.1.3 Propriedades mecânicas

3.1.3.1 Resistência à compressão dos blocos

O ensaio de resistência à compressão simples dos blocos cerâmicos utilizados nesta pesquisa foi conduzido no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). O equipamento empregado foi uma prensa hidráulica automática da marca Shimadzu, com capacidade máxima de 500 kN (Figura 27), devidamente calibrada, com velocidade de 0,0005 mm/min e em conformidade com os requisitos das normas técnicas aplicáveis, assegurando a precisão dos resultados obtidos.



Figura 27 - Prensa Shimadzu, 500kN.
Fonte – Autoria Própria.

Para realizar o ensaio, uma carga foi aplicada até a ruptura do corpo de prova, e a resistência à compressão de cada corpo de prova cilíndrico foi determinada utilizando a Equação 4.

$$\sigma = \frac{F}{A} \times 10^{-6} \quad (\text{Equação 4})$$

onde:

σ : resistência à compressão, expressa em megapascals (MPa);

F: máxima força alcançada, expressa em newton (N);

A: área bruta da seção do corpo de prova, expressa em metros quadrados (m²).

A resistência característica (f_{bk}) é o parâmetro primordial de uma unidade para uso como alvenaria estrutural. Sua determinação foi feita por meio de ensaios de compressão individuais, conforme detalhado no parágrafo anterior. Este ensaio segue as especificações conforme NBR 15270-3 (ABNT, 2023) anexo C.

De acordo com essa norma, é definido que o f_{bk} deve possuir no mínimo 4,0 MPa, e que, para isso, sejam ensaiados no mínimo 13 blocos cerâmicos. Caso o $f_{bk,est} < \phi f_{b(1)}$, então $f_{bk} = \phi f_{b(1)}$. O tamanho da amostra ensaiada foram de 18 blocos.

$$f_{bk,est} = 2 \cdot \left[\frac{f_{b(1)} + f_{b(2)} + f_{b(3)} + \dots + f_{b(i-1)}}{i-1} \right] - f_{b(1)} \quad (\text{Equação 5})$$

onde:

$f_{bk,est}$: é a resistência característica estimada da amostra, expressa em MPa;

$f_{b(1)} + f_{b(2)} + f_{b(3)} + \dots + f_{b(i-1)}$: são os valores de resistência á compressão individual dos corpos de prova, em ordem crescente;

n : é a quantidade de blocos da amostra.

$$i = \begin{cases} \frac{n}{2}, & \text{se } n \text{ for par} \\ \frac{n-1}{2}, & \text{se } n \text{ for ímpar} \end{cases}$$

Para garantir que um bloco estrutural tenha a resistência necessária para suportar as cargas aplicadas em uma construção, é fundamental realizar o cálculo da resistência à compressão. Esse cálculo pode ser feito em relação a área bruta e a área líquida, entretanto, nesta pesquisa considerou-se a área bruta do bloco, que corresponde à superfície total da seção transversal sem considerar os vazios internos.

A resistência à compressão representa um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a qualidade e o desempenho estrutural dos blocos, sendo expressa em megapascal (MPa). O valor obtido no ensaio de compressão é utilizado para classificar os blocos conforme sua capacidade de suportar esforços verticais, garantindo que atendam aos requisitos normativos e de segurança.

A área bruta é distinta da área líquida, que considera apenas a seção efetivamente resistente do bloco, descontando os vazios existentes em sua estrutura. A Figura seguinte ilustra essa diferença, destacando que:

- Área Bruta (A_b): é a área total da seção transversal do bloco, incluindo tanto as partes maciças quanto as cavidades vazadas.
- Área Líquida (A_l): corresponde apenas à soma das áreas das partes efetivamente maciças do bloco, ou seja, a porção que de fato contribui para a resistência estrutural.

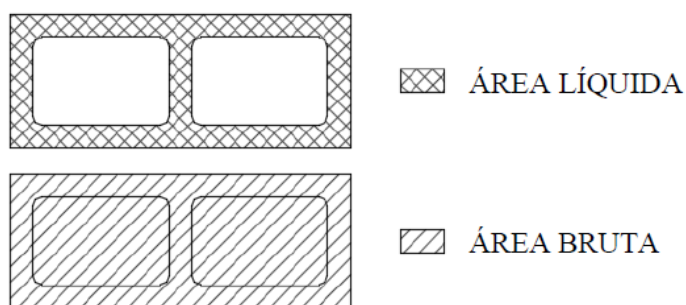


Figura 28 - Área líquida e Área bruta de um bloco estrutural.

O uso da área bruta no cálculo da resistência à compressão permite uma padronização dos ensaios laboratoriais e assegura que os blocos estejam dentro dos parâmetros normativos. A Figura 29 mostra os blocos capeados no laboratório da UENF.

Para a realização do capeamento as faces superior e inferior de cada bloco foram limpas para remover partículas soltas, poeira e quaisquer irregularidades que pudessem comprometer a aderência da argamassa. Em seguida, procedeu-se à preparação da argamassa, composta por cimento Portland. A argamassa foi aplicada de forma uniforme sobre uma superfície plana e rígida, onde o bloco foi assentado cuidadosamente, de modo a formar uma camada de capeamento com espessura controlada, usualmente entre 3 e 5 mm.

Após o assentamento, verificou-se o nivelamento e o paralelismo das superfícies capeadas, assegurando que a camada formada não apresentasse inclinações ou variações significativas de espessura ao longo de sua extensão. Os blocos permaneceram em ambiente protegido para permitir o processo de cura da argamassa por, no mínimo, 24 horas antes da realização dos ensaios.

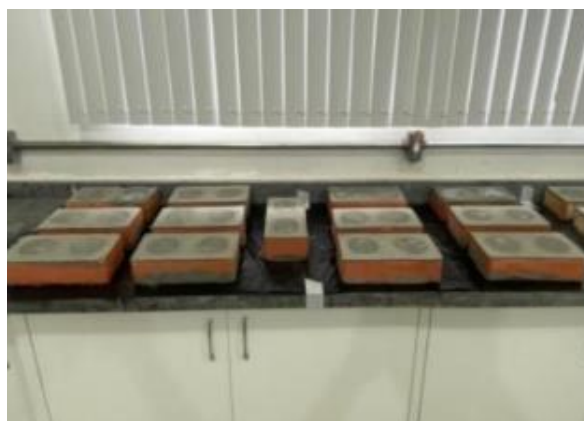


Figura 29 - Blocos capeados.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PRISMAS

3.2.1 Resistência à Compressão dos Prismas

De acordo com a NBR 16868-1 (ABNT, 2010), a resistência característica à compressão da alvenaria (f_k) pode ser estimada com base em duas abordagens experimentais: por meio da resistência característica à compressão simples de prismas (f_{pk}) ou por meio da resistência característica à compressão simples de pequenas paredes (f_{ppk}). Ambas as alternativas visam fornecer uma representação mais realista do comportamento mecânico da alvenaria, levando em consideração os efeitos da interação entre os blocos, bem como as condições de confinamento e restrição impostas pelas geometrias dos elementos construtivos.

$$f_k = 0,7 \cdot f_{pk} \quad (\text{Equação 6})$$

$$f_k = 0,85 \cdot f_{ppk} \quad (\text{Equação 7})$$

A realização desses ensaios é de fundamental importância para o dimensionamento e a verificação da segurança de sistemas construtivos em

alvenaria estrutural. Isso se deve ao fato de que a resistência à compressão da alvenaria não depende apenas da resistência individual dos blocos, mas também da maneira como esses elementos se comportam em conjunto. O ensaio em prismas ou pequenas paredes permite capturar aspectos relevantes do desempenho estrutural, como a distribuição das tensões verticais, o surgimento de fissuras, o efeito das imperfeições geométricas, e a qualidade da interface entre os componentes.

Segundo a NBR 16868-1 (ABNT, 2020), para calcular a resistência característica a compressão simples (f_k) da parede de alvenaria cerâmica, devem ser realizados ensaios conforme a NBR 8949 (ABNT, 2016) ou estimado como 70% da resistência característica de prismas (f_{pk}) ou como 85% da resistência característica de pequena parede (f_{ppk}).

Os prismas analisados, foram construídos conforme a Figura 30. Eles tiveram 5 fiadas, totalizando uma altura de 30 centímetros. Além disso, foram feitos intercalando blocos inteiros e meio blocos, com o objetivo de “amarrar” a estrutura e manter mais estável.



Figura 30 - Prisma.

Os prismas são pequenas estruturas de alvenaria compostas por dois ou mais blocos, nesta pesquisa unidos apenas por encaixe, sem a necessidade de utilização de argamassa, e representam uma fração da parede real.

a) Preparação dos Prismas

A construção dos prismas seguiu os mesmos procedimentos adotados na execução da alvenaria em obra, visando garantir a representatividade dos

resultados. No caso desta pesquisa, não foi utilizada argamassa de assentamento, sendo adotado apenas o encaixe seco dos blocos, conforme as características do sistema construtivo estudado. De acordo com a NBR 12118 (ABNT, 2016) recomenda-se a construção de, no mínimo, seis prismas para a realização do ensaio de compressão axial, sendo utilizados 12 prismas nesta pesquisa para o ensaio de compressão.

b) Ensaio de Compressão dos Prismas

Os prismas foram posicionados verticalmente em uma prensa hidráulica, com a utilização de placas metálicas rígidas nas faces de contato, com espessuras de 2 centímetros, de modo a garantir uma distribuição uniforme da carga aplicada. Os blocos localizados nas extremidades superior e inferior do prisma foram previamente capeados individualmente, assegurando superfícies planas e paralelas para o carregamento. A carga foi aplicada de forma gradual e centralizada, respeitando a taxa de carregamento (mm/s x N/s) estabelecida na norma de referência. A velocidade da máquina foi de 0,0005 mm/min e o ensaio foi conduzido até a ocorrência da ruptura total do prisma.

3.2.2 Fator de Eficiência

A eficiência estrutural é um parâmetro relevante na análise de sistemas em alvenaria, pois expressa a relação entre a resistência característica à compressão do bloco isolado (f_{bk}) e a resistência do prisma (f_{pk}). Essa relação fornece uma estimativa da contribuição efetiva do bloco para o desempenho global do sistema, considerando as imperfeições geométricas e as condições de carregamento. Valores de eficiência próximos de 1 indicam que a resistência do bloco é plenamente aproveitada no conjunto, enquanto valores significativamente inferiores sugerem perdas de desempenho relacionadas à execução ou às propriedades dos materiais associados. A Equação 8, mostra como é calculado o fator de eficiência.

$$\eta_p = \frac{f_{pk}}{f_{bk}}$$

(Equação 8)

onde:

$$\eta_p = \text{eficiência prisma/bloco.}$$

3.2.3 Correlação de Imagem Digital em Prismas

A técnica de correlação de imagem digital (DIC) é um método avançado de análise não destrutiva que permite o estudo das deformações e deslocamentos em materiais submetidos a cargas. Utilizando imagens digitais capturadas durante o ensaio, o DIC compara padrões de textura na superfície do material antes e após a aplicação da carga, possibilitando a obtenção de campos completos de deslocamento, deformação e tensão. Essa técnica oferece alta precisão, não requer contato físico com a amostra e pode ser aplicada a uma ampla variedade de materiais e condições experimentais, sendo amplamente utilizada em pesquisas estruturais e mecânicas.

Para a utilização desta técnica, são necessários alguns materiais específicos, que estão listados na Tabela 5, junto à sua finalidade.

Tabela 5 - Instrumentação utilizada para a técnica DIC.

| | |
|------------------------|-------------------------|
| Software de Captura | DigiCamControl |
| Software de Correlação | ZEISS INSPECT Correlate |
| Câmera | Cannon Rebel T7 |

A técnica DIC é exemplificada na Figura 31, na qual, ocorre a preparação da amostra (a superfície da amostra recebe um padrão randômico de pontos contrastantes, essencial para a rastreabilidade digital. Após isso, os dados são adquiridos por câmeras digitais que capturam imagens da amostra antes e durante a aplicação da carga. O terceiro passo é o processamento de imagens (algoritmos de correlação de imagem identificam a movimentação dos padrões de pontos entre as imagens sucessivas). Por fim, são feitos os cálculos de diversos parâmetros, como as deformações, na qual, o deslocamento de cada ponto na superfície da amostra é convertido em campos de deslocamento e deformação, permitindo a análise completa da resposta mecânica do material.

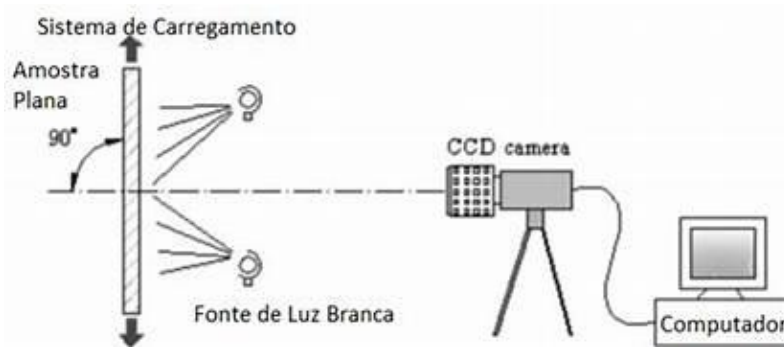


Figura 31 - Modelo da utilização da técnica DIC.

Com base na aplicação da técnica adotada, a Figura 32 apresenta a aparência final da estrutura após a preparação da superfície, a qual consistiu na aplicação de uma camada de tinta branca, utilizada como fundo, seguida da pulverização de pontos pretos com spray, necessários para o rastreamento digital. Além disso, as imagens evidenciam o posicionamento estratégico das câmeras, que foram dispostas de forma a garantir a captura precisa dos deslocamentos e deformações durante os ensaios.



(a)

(b)

Figura 32 - (a) Prisma finalizado para ensaio; (b) Posicionamento das câmeras.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PEQUENAS PAREDES

3.3.1 Resistência à compressão de pequenas paredes

A pequena parede é composta por 11 fiadas e foi construída diretamente no local de ensaio, eliminando a necessidade de qualquer realocação. A pequena parede possui dimensões de 66 centímetros de altura e 56 centímetros de

largura. Conforme mostra a Figura 33 a estrutura foi construída e submetida a um carregamento estático com velocidade de ensaio de 0,0005 mm/min com o objetivo de analisar tanto sua carga máxima de ruptura quanto seu comportamento sob deformação, utilizando o DIC para monitorar o comportamento da estrutura.

A norma NBR 16868-3 (ABNT, 2020) descreve detalhadamente os procedimentos para realização de ensaios em pequenas paredes, sendo essencial o estudo de pelo menos três corpos de prova durante os experimentos.

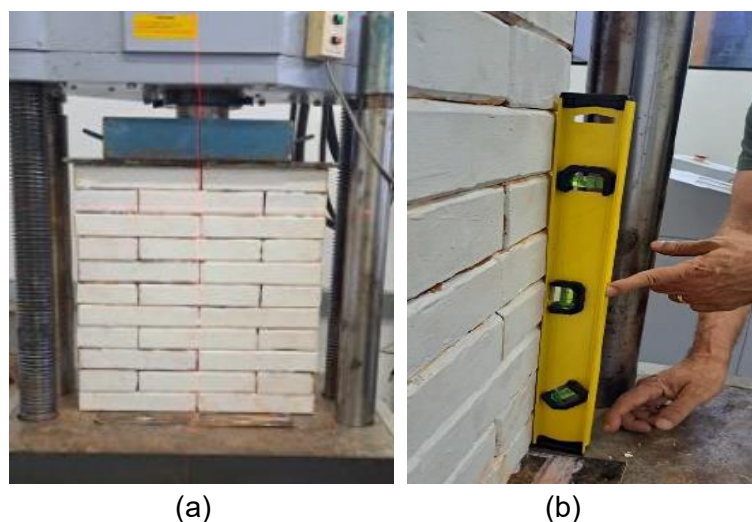


Figura 33 – (a) pequena parede, (b) nível de mão.

As paredes foram executadas diretamente no local de ensaio, em virtude do elevado peso que inviabiliza seu deslocamento. Em conformidade com as exigências normativas, foi adotado o número mínimo de três corpos de prova e a realização de capeamento dos blocos. Considerando a maior esbelteza das paredes em relação aos prismas, utilizaram-se nível a laser e nível manual durante a execução, a fim de assegurar a uniformidade geométrica da estrutura.

3.3.2 Fator de Eficiência (η_{pp})

A eficiência é um importante fator também para as pequenas paredes, esse fator representa a relação entre a resistência de bloco (f_{bk}) e a resistência de componentes com pequenas paredes (f_{ppk}), representado pela equação a seguir.

$$\eta_{pp} = \frac{f_{ppk}}{f_{bk}}$$

(Equação 9)

Gomes (1983) determinou a eficiência parede/bloco para estruturas de alvenaria entre 0,16 e 0,39, como valores satisfatórios.

3.3.3 Correlação de Imagem Digital em Pequenas Paredes

Essa técnica foi empregada nas pequenas paredes, seguindo as mesmas características do que foi realizado nos prismas. A Figura 34 ilustra a estrutura finalizada e preparada para o ensaio, a chapa utilizada no topo da pequena parede possui 10 centímetros de espessura.



Figura 34 - Pequena Parede sendo preparada para o DIC.

Para simular o comportamento da parede estrutural por meio da modelagem por elementos finitos é necessário conhecer alguns parâmetros iniciais. Portanto, foram realizados ensaios utilizando essa técnica para conhecer a deformação, deslocamento, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e o modo de ruptura.

Conforme já citado anteriormente, para realizar a técnica DIC, é necessário que a superfície da amostra seja pintada de branco, com pequenos pontos pretos distribuídos pela estrutura, de modo que as deformações e deslocamentos nesses pontos possam ser capturados. A imagem apresentada na figura 35 ilustra a disposição da câmera para a captação das imagens necessárias para o uso da DIC, bem como o posicionamento de cada

componente do ensaio. A câmera, acoplada a um tripé, foi posicionada em um ponto elevado, considerando a altura da pequena parede. Essa configuração permitiu a visualização integral da superfície da estrutura, assegurando a captação precisa das imagens necessárias para a análise.

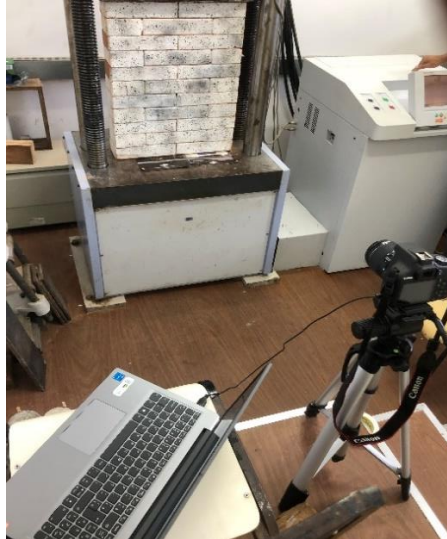


Figura 35 – Posicionamento da câmera para realização da DIC.

3.3.3.1 Módulo de Elasticidade e Coeficiente de *Poisson*

Para a determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson com maior precisão, empregou-se instrumentação específica, utilizando-se, neste caso, a técnica de Correlação de Imagens Digitais (DIC). O cálculo do módulo de elasticidade, foi realizado a partir da equação:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (\text{Equação 10})$$

onde:

- E = Módulo de Elasticidade (MPa);
- σ_1 e σ_2 = Tensões (MPa) correspondentes a dois pontos da parte linear da curva (geralmente entre 5% e 30% da tensão máxima);
- ε_1 e ε_2 = Deformações longitudinais correspondentes a σ_1 e σ_2 (adimensionais, ou em mm/mm).

A Equação 10 expressa o cálculo do módulo de elasticidade tangente e secante, obtido a partir de dois pontos pertencentes à região linear da curva

tensão–deformação. Essa formulação representa a inclinação da reta que conecta dois pontos selecionados na parte aproximadamente linear do comportamento do material, funcionando como uma estimativa da rigidez do corpo de prova dentro desse intervalo.

Para o cálculo do Coeficiente de Poisson, a fórmula utilizada é mostrada a seguir:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_\ell} \quad (\text{Equação 11})$$

onde:

- ν : Coeficiente de Poisson (adimensional);
- ε_t : Deformação transversal (expansão lateral);
- ε_ℓ : Deformação longitudinal (encurtamento na direção da carga).

3.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Para aferir os dados desta pesquisa, utilizou-se da aplicação do Método dos Dois Desvios-Padrão, com o objetivo de identificar os melhores valores em um conjunto de dados. De acordo com Montgomery e Runger (2016), o critério dos dois desvios-padrão ($\pm 2\sigma$) é amplamente utilizado para a identificação de valores atípicos em dados experimentais, especialmente quando se assume uma distribuição normal. Esse procedimento visa assegurar a consistência e a representatividade dos resultados obtidos.

A seguir, apresenta-se a sequência de procedimentos adotada para a aplicação do critério, empregado na identificação de valores atípicos em conjuntos de dados experimentais. As etapas são descritas de forma tópica, com o objetivo de facilitar a compreensão e a replicação do método, assegurando maior consistência estatística e confiabilidade aos resultados obtidos. Descrição do procedimento:

- Coletar o dados experimentais da variável a ser analisada (ex: resistência, deformação, etc);
- Calcular a média (μ) da amostra;

$$\mu = \frac{x_1 + x_2 + x_n}{n} \quad (\text{Equação 12})$$

- Calcular o desvio padrão amostral (σ):

$$\sigma = \frac{\sqrt{[\sum(x_i - \mu)^2]}}{(n - 1)} \quad (\text{Equação 13})$$

- Determinar o intervalo de aceitação com base na fórmula:

$$[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma] \quad (\text{Equação 14})$$

- Identificar os valores que estiverem fora do intervalo como outliers;
- Excluir os valores atípicos e recalcular a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação (se necessário);
- Calcular o Coeficiente de Variação (CV) para avaliar a dispersão relativa:

$$CV = (\sigma / \mu) \times 100\% \quad (\text{Equação 15})$$

Este método é simples e eficaz para a exclusão objetiva de valores que não representam adequadamente o comportamento da amostra. Ele é apropriado para estudos experimentais que requerem controle de qualidade estatística, especialmente em áreas como engenharia civil, materiais e ciências aplicadas (Rousseeuw, 2017).

3.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A modelagem consiste no desenvolvimento de uma representação simplificada de um fenômeno, sistema ou objeto real, com o propósito de compreender, prever ou simular seu comportamento. Essa representação, denominada modelo, pode assumir diferentes formas, como física, matemática, computacional ou conceitual (Banks *et al.*, 2010).

A modelagem computacional, foi realizada em caráter exploratório, utilizando pequenas paredes construídas com blocos e meio blocos e com as mesmas características dimensionais dos corpos de prova utilizados experimentalmente. A estrutura foi submetida a cargas estáticas, com o objetivo de avaliar seu comportamento, analisou-se também vibrações e frequências naturais da estrutura.

O software utilizado para a modelagem e análise numérica foi o ANSYS 2025 R2, uma ferramenta amplamente reconhecida pela sua robustez na simulação de problemas estruturais. O uso deste programa possibilitou a aplicação de condições de contorno realistas e a definição de um refinamento de

malha adequado, assegurando a captura precisa dos fenômenos mecânicos envolvidos na análise estática e dinâmica das pequenas paredes.

3.5.1 Análise Estática

Para simular o comportamento da parede estrutural por meio da modelagem por elementos finitos é necessário conhecer alguns parâmetros iniciais. Portanto, após a realização dos ensaios de bloco e de pequenas paredes, para conhecer a resistência a compressão, modo de elasticidade, coeficiente de *Poisson* e o modo de ruptura, esses dados são implementados no ambiente de simulação computacional. A seguir estão listados os passos básicos que foram utilizados para modelar a estrutura.

Na aba *Toolbox*, encontram-se diversas ferramentas e opções de análise disponibilizadas pelo software, permitindo ao usuário selecionar os recursos mais adequados para cada etapa da simulação. Neste caso, como nosso objetivo é analisar a estrutura de forma estática, foi escolhida a opção – *Static Structural*, conforme apresenta-se na Figura 36.

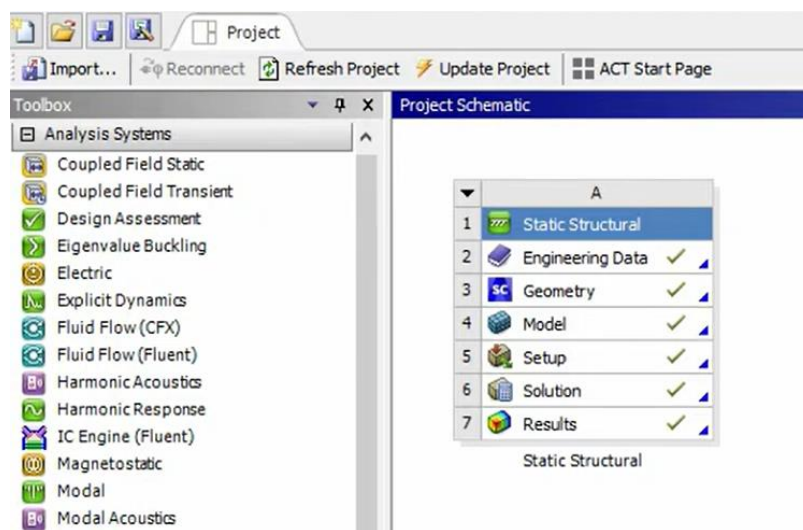


Figura 36 – Aba de análise estática estrutural.

O *Engineering Data* representa a etapa inicial no processo de modelagem, sendo o ambiente onde se realiza a seleção do material a ser utilizado. Ao acessar essa opção, o *software* disponibiliza uma biblioteca de materiais pré-definidos, contudo, para este estudo, foi realizada a implementação de um material personalizado, cujas propriedades foram ajustadas para se

assemelharem às características de um bloco cerâmico estrutural. Entre os parâmetros definidos destacam-se o módulo de elasticidade, o coeficiente de *Poisson* e a resistência característica do material. O *Engineering Data* é destacado na Figura 37, e sua biblioteca de materiais é mostrada na Figura 38.



Figura 37 - Escolha do material.

The image shows the 'Engineering Data' library interface. On the left, there is an 'Outline' pane showing 'Structural Steel' and a button to 'Click here to add a new material'. The main area is titled 'Engineering Data' and contains 'Engineering Data Sources' and 'Properties of Outline Row 1'.

Engineering Data Sources

| Name | (Ttba) Name |
|----------------------|-----------------|
| + Imported Materials | |
| | Ceramic |
| | Concrete |
| | Neoprene Rubber |
| | Steel |
| | Titanium alloy |

Properties of Outline Row 1

| Name | Value |
|-----------------------------------|-------------|
| Elasticity - Elastic Modulus | 2.e+10 MPa |
| Poisson's Ratio | 0.2 |
| Strength - Tensile Yield Strength | 2.5e-05 MPa |

Below the library, there is a table with columns A, B, D, and E. The table lists various material properties and their values.

| Property | Value | Unit | <input checked="" type="checkbox"/> |
|---|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 1 Material Field Variables | Density | kg·m ⁻³ | <input type="checkbox"/> |
| 2 2 Density | 7850 | | <input type="checkbox"/> |
| 3 3 Isotropic Secant Coefficient of Thermal | Table | | <input type="checkbox"/> |
| 4 4 Isotropic Elasticity | Table | | <input type="checkbox"/> |
| 5 5 Strain-Life Parameters | Table | | <input type="checkbox"/> |
| 7 7 S-N Curve | 2,5E+08 | Pa | <input type="checkbox"/> |
| 8 8 Tensile Yield Strength | 2,5E+08 | Pa | <input type="checkbox"/> |
| 9 9 Compressive Yield Strength | 4,5E+08 | Pa | <input type="checkbox"/> |
| 10 10 Isotropic Ultimate Strength | 0 | Pa | <input type="checkbox"/> |
| 11 11 Isotropic Thermal Conductivity | 60.5 | W·m ⁻¹ ·C ⁻¹ | <input type="checkbox"/> |
| 12 12 Specific Heat Constant Pressure, C _p | 434 | J·kg ⁻¹ ·C ⁻¹ | <input type="checkbox"/> |

Figura 38 - Biblioteca de Materiais.

O passo seguinte conforme mostrado na figura 39, é a modelagem da geometria. Essa etapa pode ser realizada em softwares externos como AutoCad e SolidWorks, ou diretamente no Ansys, por meio do *SpaceClaim*. Para esta pesquisa, optou-se por realizar a construção do modelo diretamente no ambiente do *Ansys*, sendo este um modelo tridimensional. A figura detalhada do ambiente do *SpaceClaim* se encontra no Apêndice.

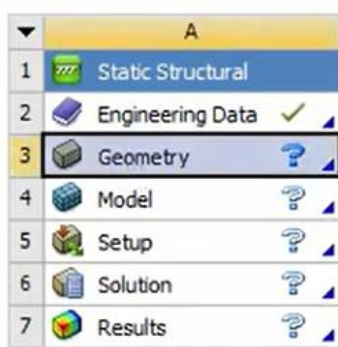


Figura 39 - Geometria da estrutura.

A quarta etapa é a opção “*Model*” conforme mostra a Figura 40 (a), ao selecionar essa janela, o software abre o *Mechanical* (Figura 40b), sendo possível primeiramente configurar a malha da geometria na opção “*Mesh*”. A geometria é discretizada em uma malha de elementos finitos. Essa malha divide a estrutura em pequenos elementos, como tetraedros, hexaedros, ou elementos de casca, dependendo da complexidade da geometria e dos requisitos da análise. Para garantir maior precisão na simulação, foi utilizado o elemento *Hex Dominant Mesh* (Malha Hexaédrica Dominante), a figura da malha se encontra no tópico de resultados. A malha Hexaédrica Dominante possibilita uma melhor representação da geometria e uma distribuição mais uniforme dos esforços ao longo da estrutura.

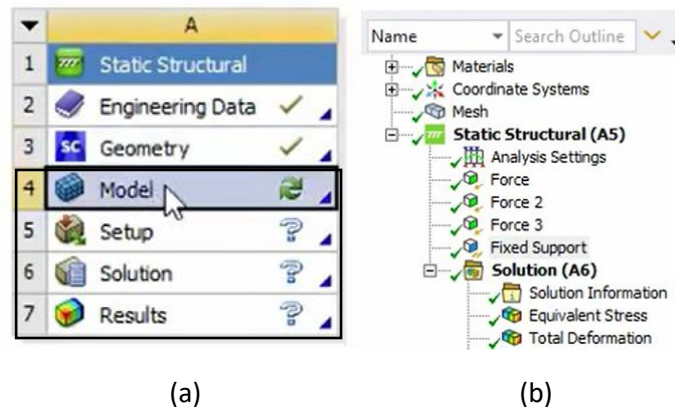


Figura 40 - (a) Modelo, (b) configurações das características de análise.

É importante ressaltar que as etapas (4) Model, (5) Setup, (6) Solution e (7) Results, são feitas no mesmo ambiente do aplicativo *Mechanical*. O “Setup” permite configurar as forças que atuam no objeto ou corpo de prova analisado, espessura, condições de contorno e outras características. Aplicou-se condições de contorno considerando travamentos na base, topo e laterais, portanto, sem graus de liberdade. O tipo de contato definido para a estrutura, foi do tipo “bonded”, que significa ligado, portanto, não há movimento nas direções normal e tangencial, os blocos são considerados uma unidade.

Foram adotadas cargas de magnitude próxima às aplicadas nos ensaios experimentais. Após isso, é necessário selecionar no software quais soluções ele deve gerar, e por fim, interpretar os resultados. No pós-processamento, os resultados da simulação, como deslocamentos, tensões, deformações, entre outros, são visualizados e analisados para entender o comportamento da estrutura e fazer conclusões sobre o seu desempenho.

3.5.2 Análise Dinâmica

Seguindo o mesmo passo a passo descrito no tópico anterior, na aba “Toolbox” são encontradas diversas opções na qual o sistema pode analisar. Neste caso, como o objetivo é analisar a estrutura submetida a cargas dinâmicas, foram escolhidas as opções – *Modal e Randon Vibration*, conforme mostrado na figura 41.

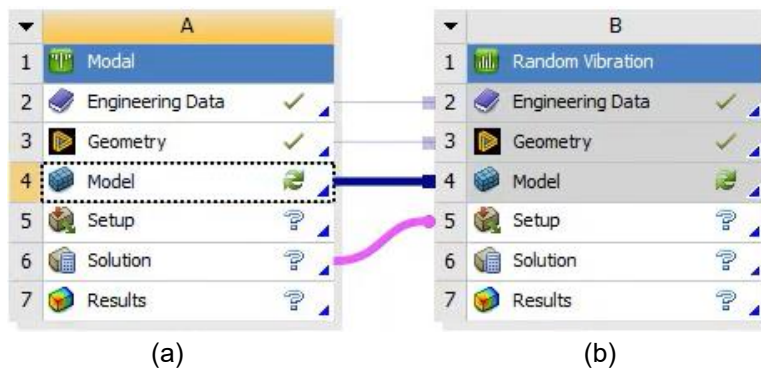


Figura 41 - Abas de opções da modelagem dinâmica.

Nas opções 2, 3 e 4, conforme é apresentado na Figura 40(a), as características foram as mesmas utilizadas na análise estática. Em *Engineering Data* foram utilizadas as mesmas propriedades de materiais, em *Geometry* as mesmas configurações do modelo tridimensional, e em *Model* o mesmo refinamento da malha.

A partir da etapa 5 (*Setup*), apresentada na Figura 42, encontram-se os procedimentos consolidados ao longo do processo de modelagem numérica. Nesta fase, foram realizadas seis análises modais, seguidas da análise de vibração aleatória, com o propósito de avaliar a resposta dinâmica da parede frente a excitações estocásticas provenientes de equipamentos em operação nas proximidades. Tal abordagem possibilitou a identificação de frequências críticas e padrões de comportamento dinâmico, mesmo na ausência de carregamentos periódicos definidos, contribuindo para uma avaliação mais abrangente do desempenho estrutural.

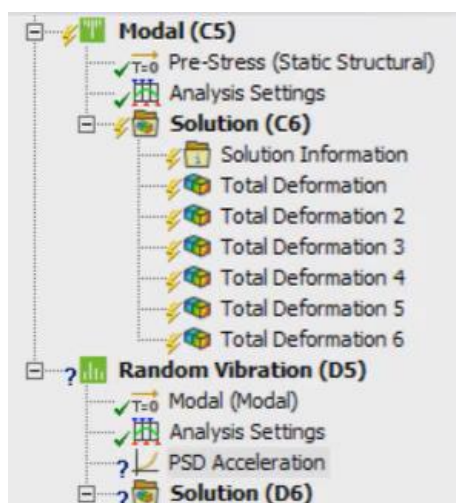


Figura 42 – Etapas de simulação da análise dinâmica.

Na etapa de pós-processamento, realizada no *ANSYS*, os resultados numéricos da simulação são organizados, visualizados e interpretados de forma criteriosa, possibilitando identificar padrões de resposta estrutural, avaliar a distribuição de tensões e deformações e, com isso, fundamentar conclusões mais precisas sobre o desempenho global da estrutura analisada.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se, nesta seção, os resultados obtidos nos ensaios experimentais utilizando os BCEPQ e os resultados numéricos. A metodologia adotada foi estruturada em diferentes etapas, iniciando-se pela caracterização física e mecânica dos blocos e avançando para a análise do comportamento estrutural de prismas e pequenas paredes submetidos a carregamentos estáticos. Essa abordagem visa garantir uma avaliação criteriosa e abrangente do material em estudo.

A primeira parte contempla os ensaios geométricos, físicos e mecânicos realizados com os BCEPQ, os quais possibilitam uma análise aprofundada das propriedades do material e de sua influência sobre o desempenho global das alvenarias estruturais. Esses resultados são fundamentais para compreender as limitações e potencialidades do material quando utilizado em sistemas construtivos.

Na sequência, apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão aplicados a prismas e pequenas paredes, com enfoque nos parâmetros de resistência, deformabilidade e nos mecanismos de ruptura observados. Tais ensaios contribuem para uma avaliação crítica da capacidade de carga e da estabilidade da alvenaria.

Por fim, foi desenvolvida a modelagem numérica tridimensional no *software* ANSYS 2025 R2, com o intuito de simular o comportamento das pequenas paredes sob carregamentos estáticos e dinâmicos. A modelagem tem como finalidade complementar os ensaios experimentais, possibilitando uma validação dos dados obtidos e contribuindo para a compreensão do desempenho estrutural do sistema analisado.

Os resultados apresentados neste estudo ampliam a compreensão do comportamento dos BCEPQ no âmbito da construção civil, oferecendo subsídios relevantes para decisões de projeto e incentivando o uso racional e eficiente desses blocos em aplicações estruturais.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS

4.1.1 Análise Dimensional

As dimensões dos blocos cerâmicos foram obtidas conforme os procedimentos e tolerâncias estabelecidos pela NBR 15270-1 (ABNT, 2023). A realização dessas medições é essencial para a verificação da conformidade dimensional dos blocos, possibilitando a identificação de unidades que eventualmente ultrapassem os limites máximos de variação permitidos pela norma. A Tabela 6 apresenta os valores médios, os desvios padrão e os coeficientes de variação das dimensões aferidas nos blocos cerâmicos avaliados. Os resultados mostram que as medidas dos blocos estão em conformidade com a norma, os demais dados complementares encontram-se disponíveis no Apêndice 1.

Tabela 6 - Características geométricas dos blocos.

| Dimensão | Média (mm) | Desvio Padrão | Coef. de Variação (%) |
|-------------|------------|---------------|-----------------------|
| Comprimento | 280,91 | 1,04 | 0,37 |
| Largura | 140,51 | 0,71 | 0,51 |
| Altura | 61,48 | 0,46 | 0,73 |

4.1.2 Índice de Absorção de Água

O ensaio de absorção de água (AA) dos blocos cerâmicos utilizados neste estudo foi realizado de acordo com as diretrizes estabelecidas pela NBR 15270-1 (ABNT, 2023). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de Absorção de Água.

| Propriedade | Média | Desvio Padrão | Coef. de Variação (%) |
|-------------|-------|---------------|-----------------------|
| AA (%) | 22,83 | 0,02 | 0,14 |

O valor de absorção de água obtido para o bloco cerâmico avaliado foi de 22,83% excedendo o limite recomendado pela NBR 15270-1 (ABNT, 2023), que estabelece para blocos cerâmicos estruturais valores máximos típicos na faixa de 8% a 21%, a depender da categoria. Esse resultado indica porosidade aberta elevada, o que pode estar associado a queima insuficiente (temperatura ou tempo inadequados), massa cerâmica com granulometria heterogênea ou conformação com baixa compactação, fatores que dificultam a sinterização e o fechamento dos poros durante a queima (Mehta *et. al*, 2014).

Cerqueira (2017), Alexandre (2012) e Pedroti *et al.* (2011) estudaram blocos cerâmicos prensados (BPQ) e relataram valores de absorção de água de

20,49%, 21% e 31,85%, respectivamente. Observa-se uma diferença significativa entre os resultados do presente trabalho e os de Pedroti *et al.* (2011), com uma discrepância de aproximadamente 28%. Os dados detalhados dos ensaios encontram-se no Apêndice 1.

4.1.3 Massa Específica Aparente

A massa específica aparente dos blocos analisados neste estudo obtiveram um resultado médio de 1,18 g/cm³. Este resultado indica um material com densidade moderada. A presença de poros internos, característica dos processos de extrusão e queima, contribui para a redução da massa específica, sem comprometer significativamente o desempenho estrutural, desde que controlada adequadamente. No Apêndice 1, apresentam-se os resultados obtidos de cada bloco para este ensaio.

4.1.4 Resistência à Compressão dos blocos

As áreas bruta e líquida dos blocos cerâmicos estão apresentadas na Tabela 8. Ressalta-se que essas medidas não foram submetidas a tratamento estatístico, utilizando como base a média.

Tabela 8 - Área Bruta e Líquida dos Blocos Cerâmicos.

| Bloco Cerâmico | Média (mm ²) |
|---------------------------------|--------------------------|
| Área Bruta (mm ²) | 39200,00 |
| Área Líquida (mm ²) | 34206,46 |
| Área Líquida / Área Bruta (%) | 87 |

Na Tabela 9, encontram-se os valores da resistência média à compressão e da resistência característica, considerando a área bruta.

Tabela 9 - Resistência dos Blocos Cerâmicos.

| Bloco Cerâmico | Área Bruta |
|----------------------------------|------------|
| Resistência Média (MPa) | 7,35 |
| Resistência Característica (MPa) | 4,86 |
| Desvio Padrão (MPa) | 1,82 |
| Coef. de Variação (%) | 24,60 |

Todos os valores de resistência à compressão, considerando a área bruta, estiveram acima do limite mínimo de 4 MPa estabelecido pela NBR 15270-3 (ABNT, 2023). O coeficiente de variação foi elevado, podendo ser explicado pela diferença nos lotes dos blocos analisados e queima não uniforme deste material. Para uma análise detalhada dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão dos blocos cerâmicos avaliados, recomenda-se a consulta ao Apêndice 1, onde se encontram os dados individuais e complementares dos corpos de prova ensaiados.

4.1.5 Módulo de Elasticidade dos Blocos

A resistência característica à compressão dos blocos foi de 4,86 MPa, logo, o módulo de elasticidade determinado foi de 2916 MPa ou 2,92 GPa. O valor do módulo de deformação foi utilizado como parâmetro na modelagem numérica dos prismas, junto ao coeficiente de *Poisson*, que segundo a norma é de 0,15 para blocos cerâmicos. A equação 16, fornecida pela NBR 15812-1 (ABNT, 2010) explicita o cálculo para encontrar o valor do módulo de elasticidade.

$$E = 600 \cdot f_{bk} \quad (\text{Equação 16})$$

onde:

E = módulo de deformação longitudinal, em GPa;

f_{bk} = resistência característica dos blocos e tijolos cerâmicos, em MPa.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PRISMAS

4.2.1 Resistência à Compressão de Prismas

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial f_{pk} realizados em doze corpos de provas estão apresentados na Tabela 10. No entanto, apenas os resultados de onze prismas foram considerados, em conformidade com o critério de exclusão de dados adotado.

Para o cálculo da resistência dos prismas utilizou-se o Método dos Dois Desvios-Padrão ($\pm 2\sigma$), a Tabela completa, incluindo os dados rejeitados estão no Apêndice 2.

Tabela 10 - Resistência dos Prismas.

| Nº de Prismas | Área Bruta (mm ²) | Resistência Média (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | Coefficiente de Variação (%) |
|---------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------------|
| 11 | 39200 | 1,66 | 0,35 | 21,13% |

O prisma apresentou resistência à compressão de 1,66 MPa, valor inferior ao intervalo típico para prismas com juntas argamassadas, que corresponde de 40% a 70% da resistência dos blocos (Hamid, 2005). A ausência de argamassa limitou o contato efetivo entre unidades, concentrando tensões devido a irregularidades e desvios dimensionais (Gomes, 1993). Somada a isso, a elevada absorção de água (22,83%) indica alta porosidade aberta, fator que reduz a resistência mecânica do bloco. Esses aspectos explicam a baixa capacidade de carga observada.

4.2.2 Módulo de Elasticidade dos Prismas

O módulo de elasticidade dos prismas foi estimado seguindo as recomendações da NBR 16868-1 (ABNT, 2020), na qual diz que o módulo é dado por $600 \cdot f_{pk}$. A resistência média à compressão dos prismas foi de 1,66 MPa, e, com base nesse valor, o módulo de elasticidade médio dos prismas está apresentado na Tabela 11. Além disso, a norma estabelece que o coeficiente de *Poisson* para blocos e tijolos cerâmicos é de 0,15. A tabela completa com o valor do módulo de elasticidade de cada prisma se encontra no Apêndice 2.

Tabela 11 - Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson.

| Elemento | Módulo de Elasticidade (MPa) | Coefficiente de Poisson |
|----------|------------------------------|-------------------------|
| Prisma | 996 | 0,15 |

4.2.3 Fator de Eficiência dos Prismas

Os resultados da eficiência prisma/bloco são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Fator de Eficiência (prisma/bloco).

| Elemento | f_{pm} (MPa) | f_{bm} (MPa) | Fator de Eficiência (η_p) |
|----------|----------------|----------------|----------------------------------|
| Prisma | 1,66 | 7,35 | 0,23 |

Os prismas apresentaram uma resistência média à compressão $f_{pm} = 1,66$ MPa, significativamente inferior à resistência média dos blocos individuais, $f_{bm} = 7,35$ MPa. Essa diferença expressiva revela a influência direta das descontinuidades no contato entre os blocos e da esbeltez do elemento. O fator de eficiência obtido, $\eta_p = 0,23$, confirma que apenas 23% da resistência dos blocos é efetivamente mobilizada quando eles são agrupados em forma de prisma. Em outras palavras, o desempenho estrutural do conjunto é sensivelmente reduzido quando comparado ao elemento isolado. Esse comportamento é amplamente relatado na literatura e decorre principalmente da concentração de tensões na região de contato entre blocos, da heterogeneidade do material e da incapacidade das juntas de transferirem uniformemente os esforços aplicados. Além disso, pequenas imperfeições geométricas e variações na espessura das juntas contribuem para um estado de tensões não uniforme, favorecendo a ruptura prematura. Dessa forma, os resultados obtidos evidenciam que os prismas tendem a apresentar menor capacidade resistente que os blocos isolados, reforçando a importância da avaliação do conjunto para uma estimativa realista do desempenho estrutural da alvenaria.

4.2.4 Correlação de Imagem Digital em Prismas

A região dos prismas que foi analisada, é exemplificada na Figura 43. Para essa técnica, foram utilizados 6 prismas, além disso, foram analisadas quatro regiões, sendo estas denominadas componentes de superfície, ou etiquetas.

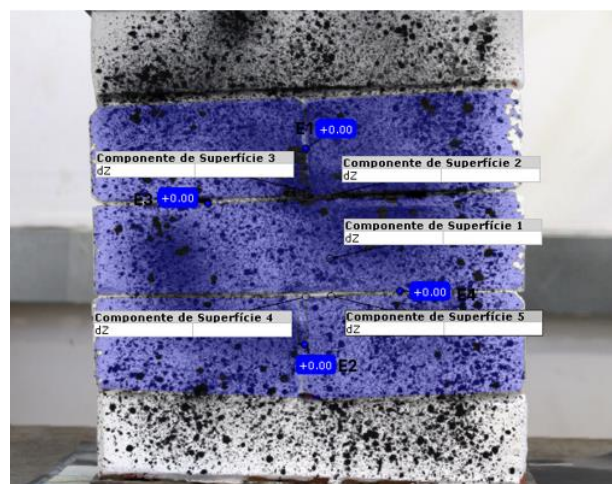


Figura 43 - Etiquetas de desvio.

A Figura 44 apresenta etiquetas de cores utilizadas para distinguir o comportamento ou as características específicas de cada ponto da estrutura ao longo do tempo. Esse recurso permite evidenciar variações de tensão ou deformação. A codificação cromática facilita a correlação entre cada ponto monitorado e as variáveis analisadas, possibilitando o rastreamento claro e organizado do comportamento estrutural. Nesta representação, as cores adotadas foram azul, cinza, amarelo e laranja.

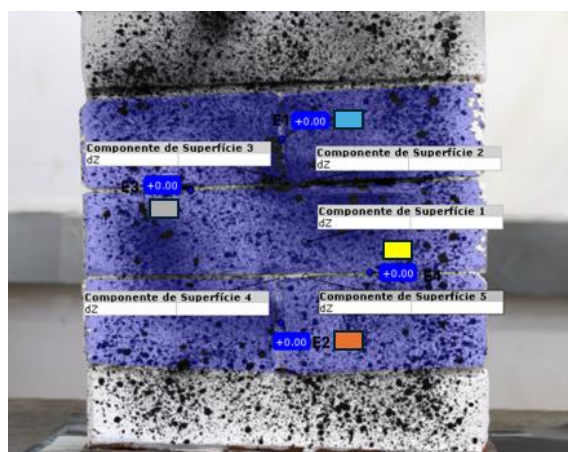


Figura 44 - Etiquetas de desvio, separação por cores.

4.2.4.1 Análise Tensão(σ) vs Deformação(ϵ) de Prismas

O gráfico de tensão versus deformação é fundamental na caracterização mecânica de prismas de alvenaria, pois permite visualizar o comportamento estrutural do material sob carregamento. Por meio dele, é possível identificar propriedades essenciais como o módulo de elasticidade, o limite de proporcionalidade, a tensão de ruptura e a capacidade de deformação do prisma até o colapso. Nas Figuras 45 a 50, os gráficos tensão x deformação para os seis prismas são apresentados.

y

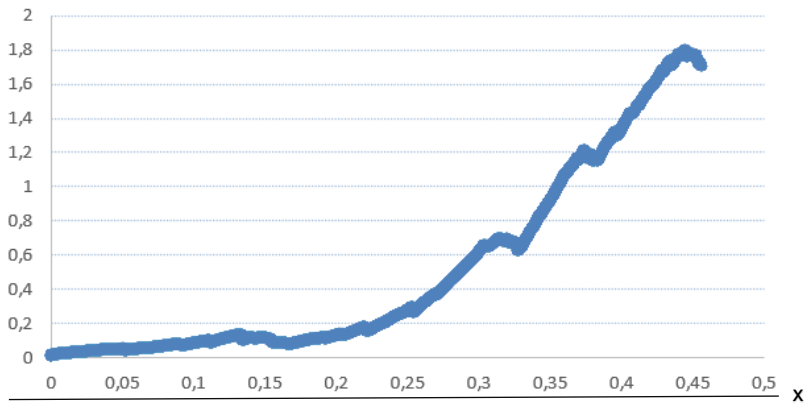


Figura 45 - Prisma 1.

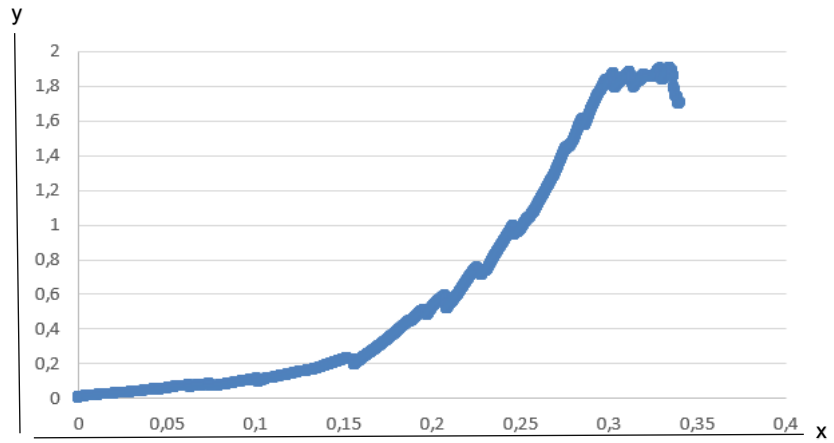


Figura 46 - Prisma 2.

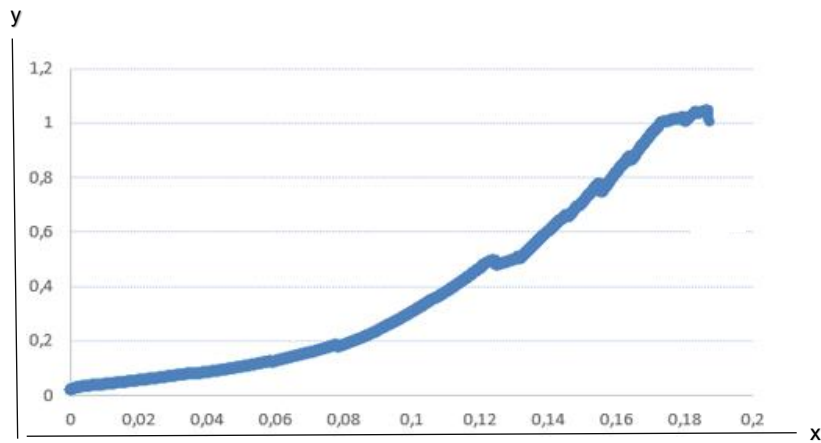


Figura 47 - Prisma 3.

y

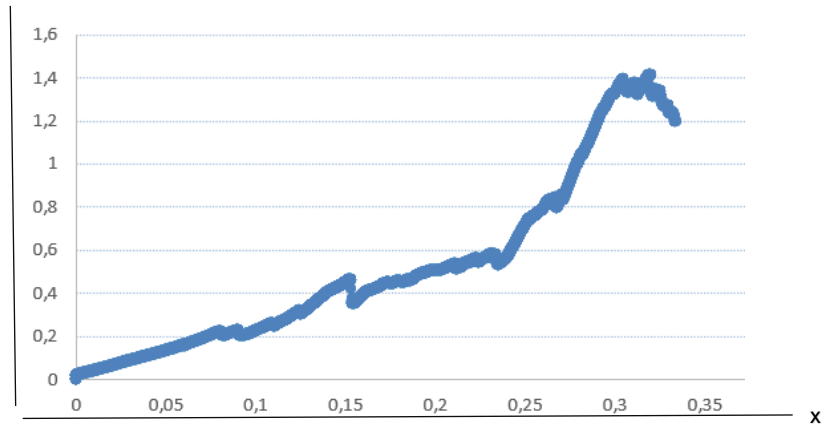


Figura 48 - Prisma 4.

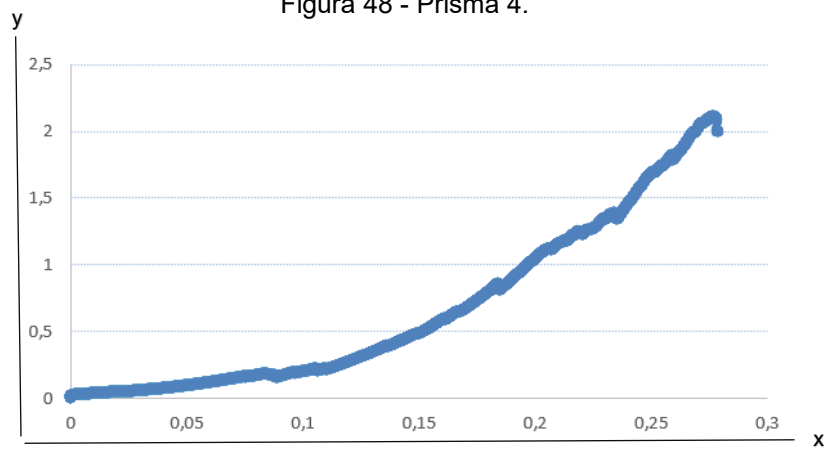


Figura 49 - Prisma 5.

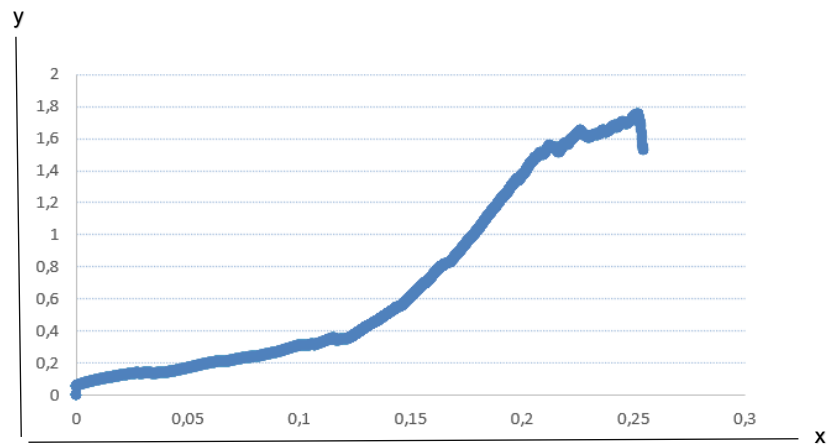


Figura 50 - Prisma 6.

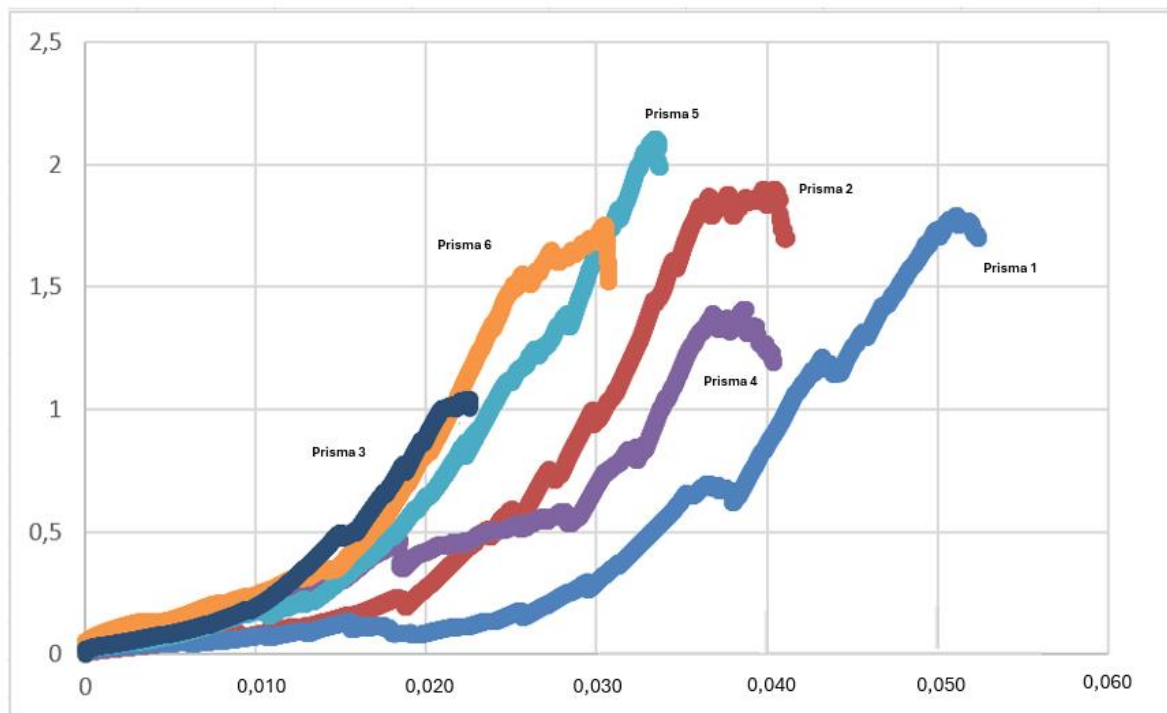


Figura 51 - Gráfico comparativo dos prismas.

Conforme mostra a figura 51, as curvas apresentaram comportamento coerente com o esperado para elementos de alvenaria estrutural, caracterizando-se por uma fase inicial não linear de acomodação, seguida por uma região de crescimento quase linear da tensão com a deformação, e, posteriormente, uma perda gradual de rigidez até o atingimento do pico de resistência. A rigidez inicial das curvas variou levemente entre os prismas, o que pode ser atribuído a pequenas diferenças nas propriedades dos blocos. Em todos os casos, observou-se um aumento significativo de rigidez após a fase inicial, indicando o início da resposta elástica do conjunto bloco-argamassa. O comportamento pós-pico das curvas foi marcado por uma queda acentuada na tensão, evidenciando uma ruptura frágil típica de materiais cerâmicos, com pouca ou nenhuma capacidade de redistribuição de esforços após a máxima carga. As deformações associadas ao pico de tensão variaram em aproximadamente 0,20 mm/mm, enquanto os valores máximos de tensão se concentraram em torno de 1,6 a 1,8 MPa. Essas variações estão dentro da faixa observada na literatura para prismas de alvenaria cerâmica, especialmente considerando o uso de blocos com baixa capacidade de absorção de deformações plásticas.

O gráfico de tensão x deformação dos prismas de alvenaria estrutural sem argamassa apresenta uma fase inicial de resposta reduzida. Esse comportamento é atribuído ao tempo necessário para a reorganização dos blocos, que, devido ao seu assentamento sem argamassa e geometria, apresentam superfícies desniveladas. Durante essa fase, as unidades se ajustam sob a ação da carga aplicada, resultando em uma deformação inicial sem incremento significativo de tensão.

4.2.4.2 Equivalente de deformação de Von Mises

É uma medida escalar que representa a intensidade da deformação em um ponto qualquer de um material submetido a um estado de deformação tridimensional. É inspirada no conceito de tensão de von Mises, mas aplicada às deformações em vez das tensões. As Figuras 52 a 57 mostram os gráficos de acordo com cada cor de etiqueta analisada.

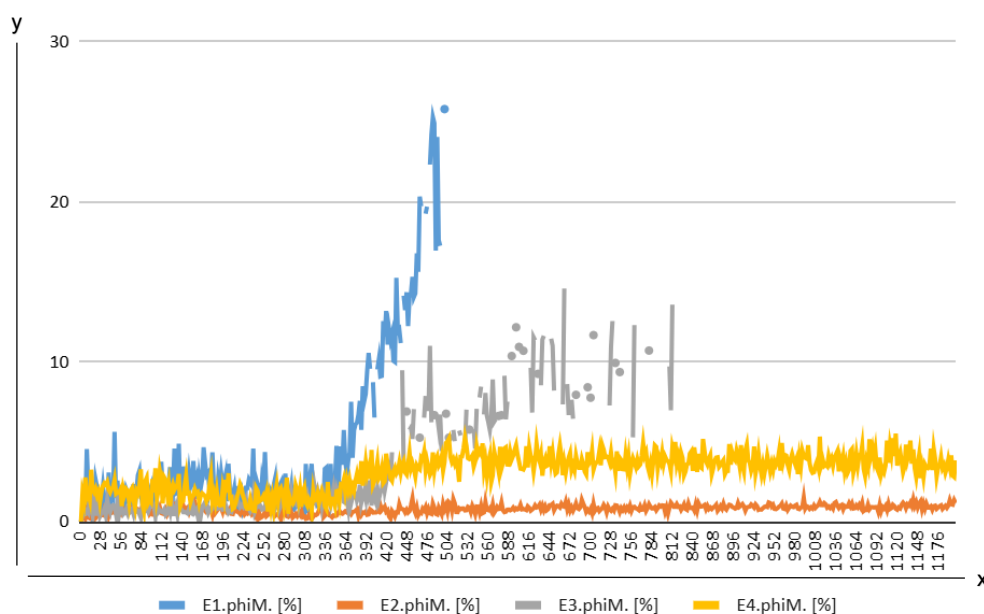


Figura 52 - Gráfico Equivalente de deformação de von Mises (y) vs Tempo (x): (Prisma 1).

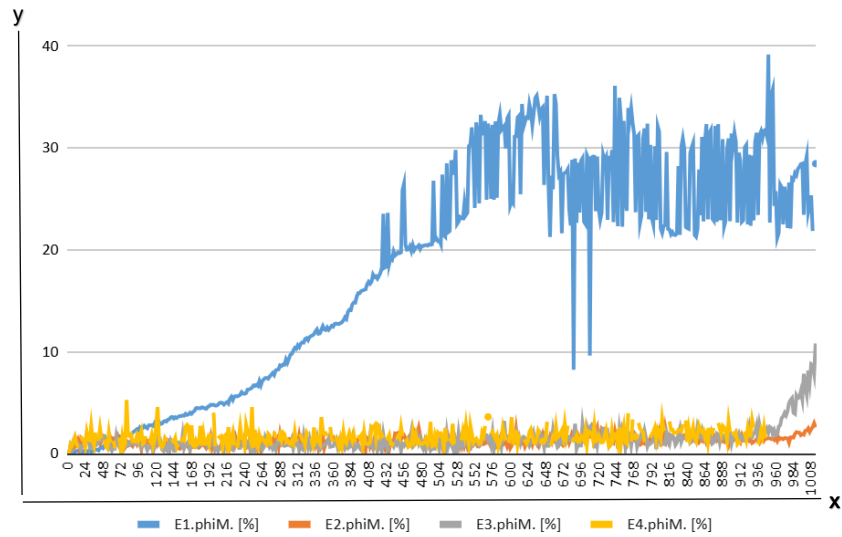


Figura 53 - Gráfico Equivalente de deformação de von Mises (y) vs Tempo (x): (Prisma 2).

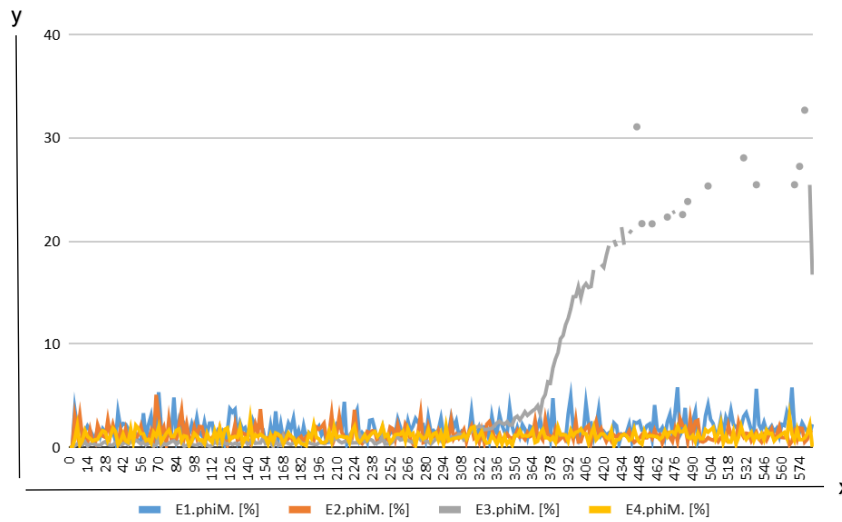


Figura 54 - Gráfico Equivalente de deformação de von Mises (y) vs Tempo (x): (Prisma 3).

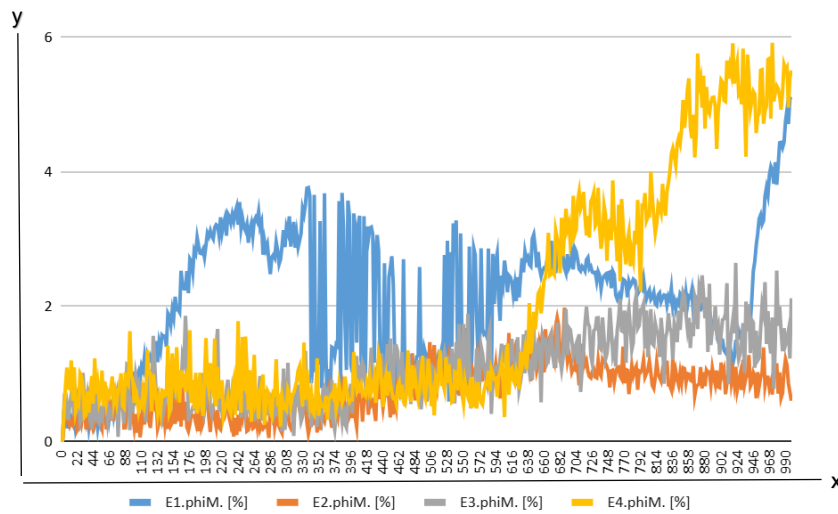


Figura 55 - Gráfico Equivalente de deformação de von Mises (y) vs Tempo (x): (Prisma 4).

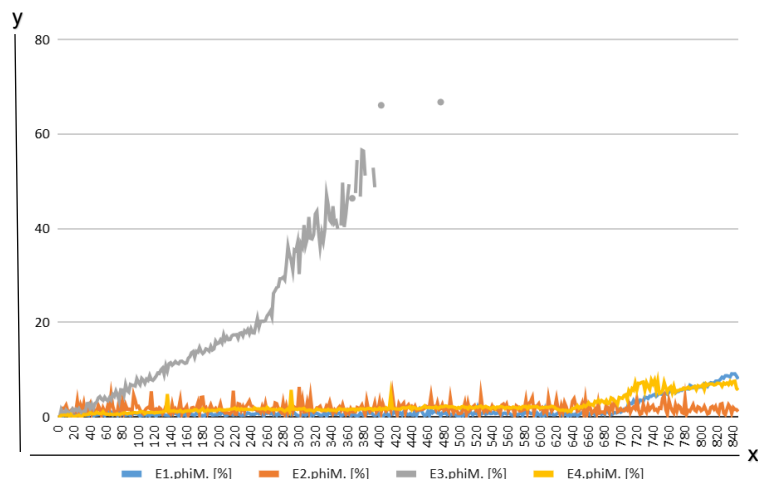


Figura 56 - Gráfico Equivalente de deformação de von Mises (y) vs Tempo (x): (Prisma 5).

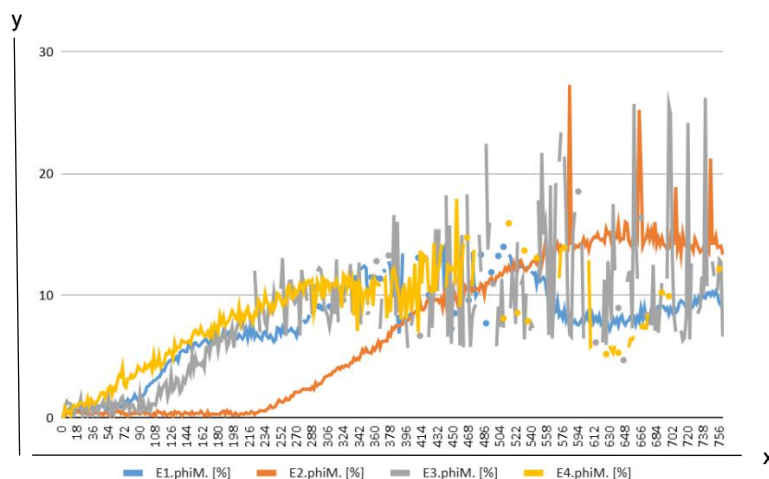


Figura 57 - Gráfico Equivalente de deformação de von Mises (y) vs Tempo (x): (Prisma 6).

As medições, realizadas por meio da (DIC), permitiram identificar os pontos de maior solicitação e o comportamento localizado dos materiais. Observou-se aumento progressivo das tensões em ao menos uma das regiões analisadas, refletindo o acúmulo de deformações até o colapso. Em diversos prismas, a região E1 (azul) concentrou os maiores valores de tensão, com crescimento contínuo até o pico, seguido por queda abrupta, característica de ruptura frágil. Em outros casos, como nos gráficos das Figuras 52 e 54, a região E3 (cinza) foi a mais solicitada, sugerindo concentração de tensões no contato entre os blocos.

As regiões E2 (laranja) e E4 (amarelo) apresentaram comportamento mais estável na maioria dos ensaios, com menores amplitudes de tensão. Nos gráficos com maiores oscilações (como os gráficos das Figuras 53 e 57), é

possível notar instabilidades pós-pico e redistribuições de esforços, associadas à ruptura progressiva.

Em alguns casos, os valores de ϕ_M conforme mostrados no gráfico, ultrapassaram 30 %, chegando a picos superiores a 60 % em E3, indicando intensa concentração de tensões localizadas. Essa distribuição heterogênea confirma o comportamento não linear e frágil dos prismas cerâmicos. O parâmetro ϕ_M ou ϕ_M (%) representa o índice percentual de variação ao longo do tempo, indicando o nível de instabilidade ou flutuação relativo das medições. Valores mais elevados de ϕ_M refletem maior dispersão e maior sensibilidade no intervalo analisado.

O equivalente de deformação de Von Mises é útil na análise de prismas de alvenaria cerâmica, pois sintetiza efeitos de tensões multiaxiais e permite identificar regiões de alta deformação em materiais frágeis, mesmo sem indicar diretamente falha. Estudos, como o de Yang *et al.* (2019), mostram sua aplicação em simulações por elementos finitos, evidenciando áreas críticas de deformação e contribuindo para uma melhor compreensão do comportamento estrutural dos prismas.

4.2.4.3 Deformação

A deformação (*strain*) é uma grandeza que representa o quanto um corpo se deforma quando submetido a uma carga. Em materiais estruturais, essa deformação pode ocorrer por tração ou compressão, sendo expressa de forma adimensional ou em porcentagem.

Na presente análise, optou-se por avaliar a *strain* menor, ou seja, situações nas quais o material apresentou baixos níveis de deformação antes da ruptura. Conforme destacado por Drysdale, Hamid e Baker (2008) essa abordagem é particularmente adequada para materiais frágeis, como os blocos cerâmicos estruturais, que não apresentam grande capacidade de deformação plástica antes da falha. As Figuras 58 a 63 mostram os gráficos fornecidos pela DIC nas regiões analisadas (etiquetas 1,2,3 e 4).

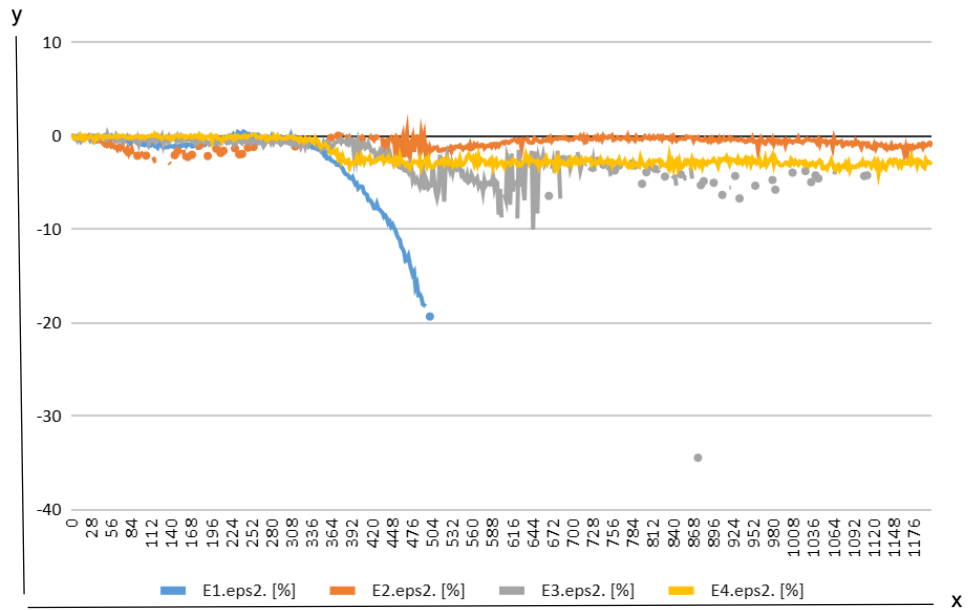


Figura 58 - Gráfico de tempo(s) vs deformação(%): (Prisma 1).

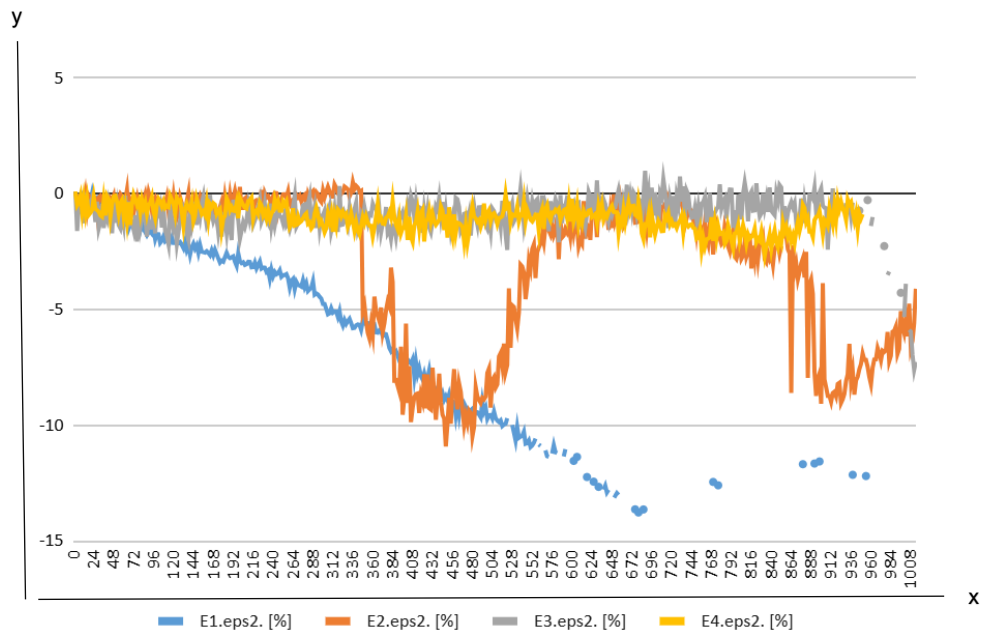


Figura 59 - Gráfico de tempo(s) vs deformação(%): (Prisma 2).

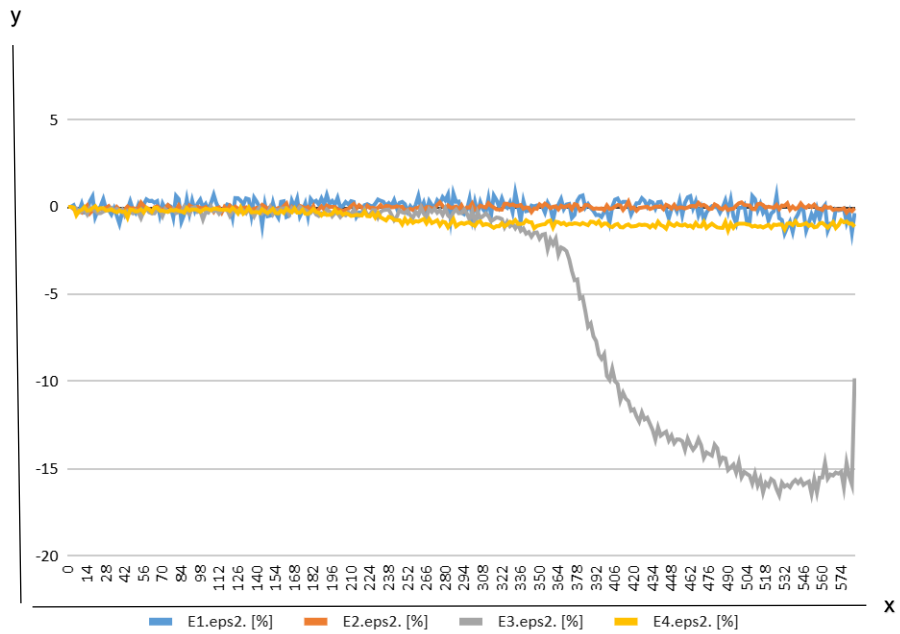


Figura 60 - Gráfico de tempo(s) vs deformação(%) (Prisma 3).

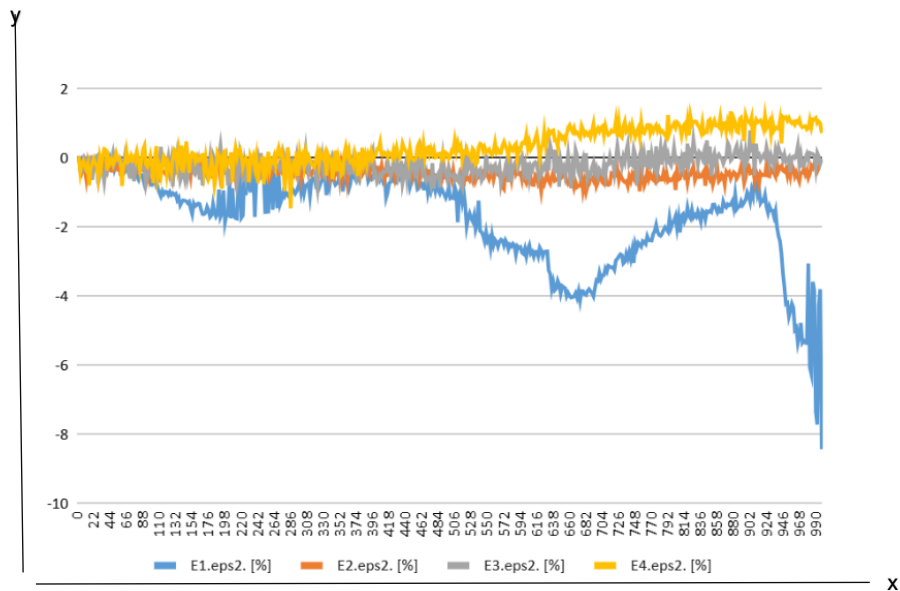


Figura 61 - Gráfico de tempo(s) vs deformação(%) (Prisma 4).

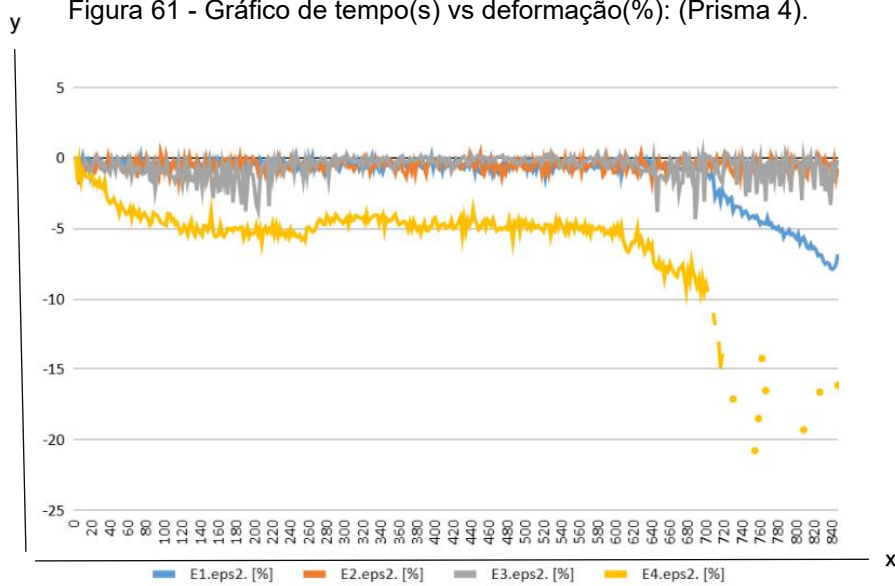


Figura 62 - Gráfico de tempo(s) vs deformação(%) (Prisma 5).

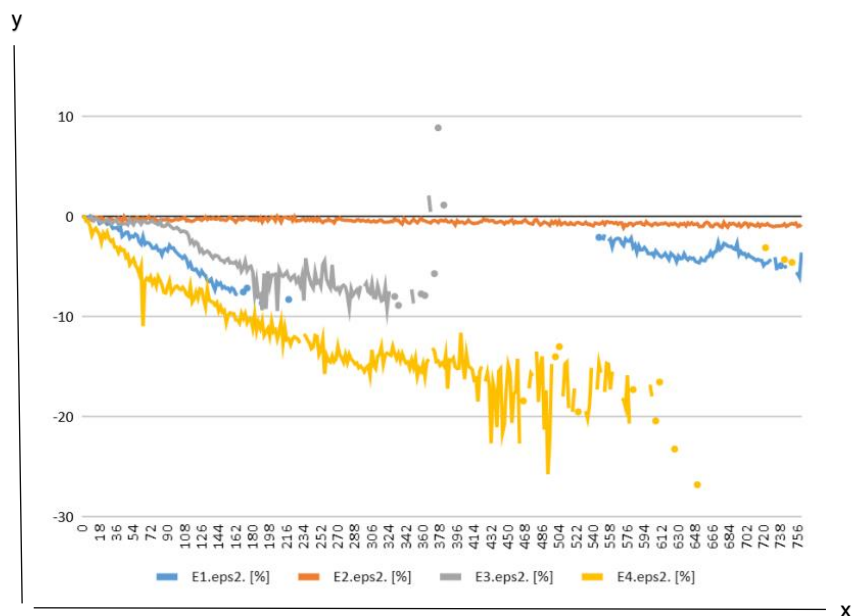


Figura 63 - Gráfico de tempo(s) vs deformação(%): (Prisma 6).

Foram apresentados os gráficos de deformação em função do tempo para quatro pontos distintos de medição (E1, E2, E3 e E4) sobre o corpo de prova ensaiado. Observa-se que na maioria dos casos (Figuras 58, 60, 61, 62) apresentam uma redução significativa de deformação ao longo do tempo em apenas um ponto específico, indicando possível concentração de tensões ou início de fissuração nessa região. Esse tipo de gráfico permite avaliar a evolução do comportamento estrutural sob carregamento contínuo, sendo especialmente útil na identificação de regiões críticas e no monitoramento da integridade do material cerâmico.

4.2.5 Análise de Ruptura dos Prismas

Observou-se dois tipos distintos de ruptura nos blocos cerâmicos durante os ensaios de compressão (Figura 64). O primeiro tipo foi caracterizado pela formação de uma fissura vertical central ao longo dos blocos (Figura 63a). Este comportamento indica uma falha típica por tração, resultante da aplicação de esforços compressivos. Embora o carregamento principal seja de compressão, a ruptura por tração ocorre devido à limitação da resistência à tração do material, comum em materiais frágeis como a cerâmica. (Monteiro, 2014).

O segundo tipo de ruptura (Figuras 63b e 63c) foi o destacamento dos blocos. Esse fenômeno é geralmente associado à ação do efeito *Poisson*, na qual ocorre uma compressão axial, e os blocos tendem a apresentar expansão lateral. Essa

expansão gera uma pressão interna na direção transversal, a qual pode superar a resistência à coesão lateral do material, provocando deslocamentos, fissuração ou destacamento de fragmentos. Além disso, a geometria dos blocos e a presença de descontinuidades favorecem a concentração de tensões, especialmente nas regiões onde a carga não é distribuída de forma perfeitamente uniforme.

Para Piat (2025) a combinação entre a expansão lateral e as zonas localizadas de concentração de tensões intensifica as solicitações internas, reduzindo a capacidade resistente dos blocos e favorecendo mecanismos de ruptura prematuros. Ambos os modos de ruptura reforçam o comportamento frágil e anisotrópico dos blocos cerâmicos sob cargas compressivas.

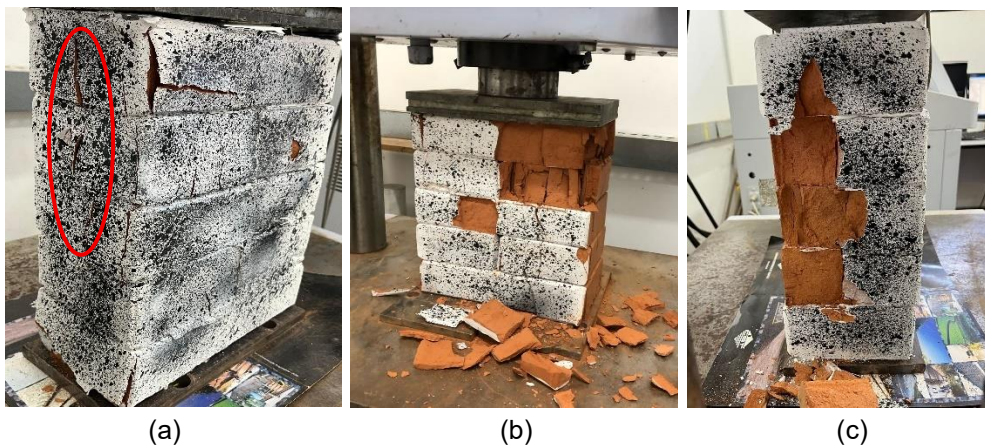


Figura 64 - Ruptura dos Prismas: (a) trinca vertical; (b) destacamento frontal; (c) destacamento lateral.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PEQUENAS PAREDES

4.3.1 Resistência à Compressão das Pequenas Paredes

Para obter a resistência média à compressão das pequenas paredes utilizou-se a mesma prensa utilizada nas etapas de cálculo de compressão de blocos e prismas. Os resultados são descritos na Tabela 13.

Tabela 13 - Resistência à Compressão de Pequenas Paredes.

| Pequena Parede | Área Bruta (mm ²) | F ruptura (N) | σ bruta (N/mm ²) | Resistência Média (MPa) | Desvio padrão | Coef. De Variação (%) |
|----------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------|-----------------------|
| 1 | 78400 | 96429,7 | 1,23 | 0,98 | 0,21 | 21,75 |
| 2 | | 66590,62 | 0,85 | | | |
| 3 | | 67853,13 | 0,87 | | | |

Utilizando o método dos dois desvios-padrão, nenhum valor de tensão de ruptura deve ser rejeitado. O intervalo a ser considerado é de [0,55:1,41], sendo assim:

- 1,23 – dentro dos limites de controle estatístico;
- 0,85 – dentro dos limites de controle estatístico;
- 0,87 – dentro dos limites de controle estatístico.

Os resultados obtidos para as três pequenas paredes indicam uma variabilidade considerável na capacidade resistente à compressão. As forças de ruptura variaram entre aproximadamente 66,6 kN e 96,4 kN, resultando em tensões brutas entre 0,85 N/mm² e 1,23 N/mm². A resistência média calculada foi de 0,98 MPa, acompanhada de um desvio-padrão de 0,21 MPa, o que evidencia uma dispersão relativamente elevada entre as amostras. Esse comportamento é reforçado pelo coeficiente de variação de 21,75%, indicando heterogeneidade significativa no desempenho estrutural das pequenas paredes.

4.3.2 Módulo de Elasticidade das Pequenas Paredes

O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, determinados conforme as especificações normativas, são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson.

| Pequena Parede | Resistência à Compressão (MPa) | Módulo de Elasticidade (MPa) | Coeficiente de Poisson |
|----------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------|
| 1 | 1,23 | 738 | 0,15 |
| 2 | 0,85 | 510 | 0,15 |
| 3 | 0,87 | 522 | 0,15 |

Na Tabela 15 os valores encontrados para o módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson* utilizando a técnica DIC são apresentados.

Tabela 15 - Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson, utilizando a DIC.

| Pequena Parede | Módulo de Elasticidade (MPa) | Módulo de Elasticidade Médio (MPa) | Coeficiente de Poisson | Coeficiente de Poisson Médio |
|----------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------|
| 1 | 798 | 761 | 0,33 | 0,32 |
| 2 | 723 | | 0,30 | |
| 3 | 427 | | 0,12 | |

As diferenças observadas entre os valores obtidos pela norma brasileira e pela técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC) se explicam pelas limitações dos métodos tradicionais, que assumem comportamento linear e isotrópico, além de captarem deformações médias em regiões restritas. A DIC, por sua vez, permite uma análise mais detalhada e sensível às variações locais de deformação, revelando efeitos anisotrópicos e zonas de concentração de tensões.

O coeficiente de Poisson mais elevado (0,32) obtido com DIC, frente ao valor normativo (0,15), evidencia uma maior deformação transversal associada à microestrutura porosa e heterogênea dos blocos cerâmicos estruturais (LIN *et al.*, 2021; ZHOU *et al.*, 2023).

4.3.3 Fator de Eficiência das Pequenas Paredes

Os resultados da eficiência pequena parede/bloco são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Fator de Eficiência (pequena parede/bloco).

| Elemento | f_{ppm} (MPa) | f_{bm} (MPa) | Fator de Eficiência (η_p) |
|----------------|-----------------|----------------|----------------------------------|
| Pequena Parede | 0,98 | 7,35 | 0,13 |

O fator de eficiência obtido (0,13) foi significativamente inferior ao esperado para paredes com blocos cerâmicos estruturais, geralmente entre 0,30 e 0,50. Para Melo (2020) isso se deve, principalmente, ao fato de a parede ter sido construída sem argamassa, apenas com encaixe seco, o que compromete a solidarização entre os blocos e reduz a capacidade resistente da parede.

4.3.4 Correlação de Imagem Digital em Pequenas Paredes

A metodologia DIC foi utilizada para examinar a área marcada na Figura 65, as etiquetas utilizadas estão ilustradas na figura, sendo essas marcações essenciais para indicar os pontos que o *software* analisará na estrutura. É importante destacar que as três paredes foram utilizadas as etiquetas de desvio na mesma região, permitindo assim uma comparação dos resultados obtidos.

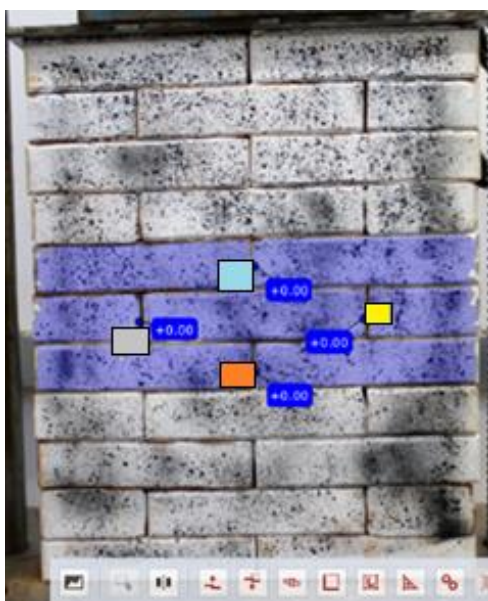


Figura 65 - Etiquetas de desvio.

4.3.4.1 Análise Tensão(σ) vs Deformação(ϵ) de Pequenas Paredes

Os gráficos tensão-deformação, obtidos a partir de ensaios mecânicos (como compressão ou tração), relaciona a tensão aplicada com a deformação resultante. A partir dele, é possível identificar fases distintas do comportamento estrutural do material, como a fase elástica, onde a deformação é reversível, e a fase plástica, onde ocorrem deformações permanentes. Em materiais frágeis, como blocos cerâmicos estruturais, essa transição é geralmente abrupta, com pequena capacidade de deformação antes da ruptura. As Figuras 66, 67 e 68 demonstram o comportamento de cada corpo de prova.

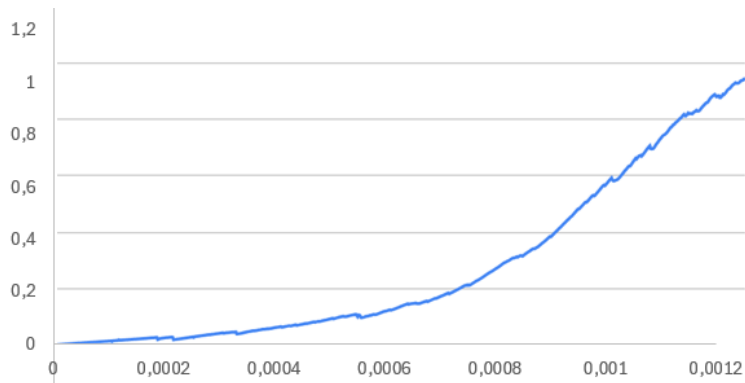


Figura 66 - Gráfico Tensão-Deformação (Mini Parede 1).

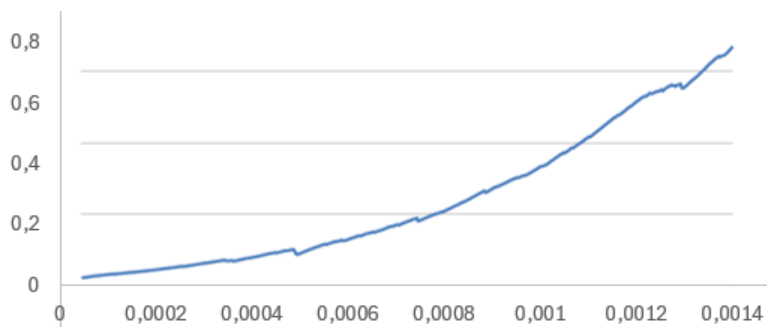


Figura 67 - Gráfico Tensão-Deformação (Mini Parede 2).

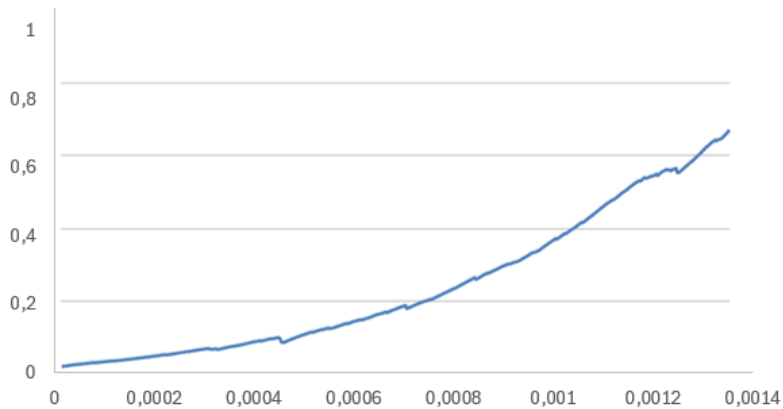


Figura 68 - Gráfico Tensão-Deformação (Mini Parede 3).

Não foi realizada carga e descarga no ensaio de pequenas paredes, porém, houve o cuidado com a aplicação da tensão na estrutura, iniciando-se o ensaio após a chapa ficar totalmente em contato com os blocos. A análise dos gráficos tensão x deformação obtidos para a pequena parede revelou um comportamento característico de materiais frágeis: o gráfico apresenta um trecho inicial quase linear, seguido por um pico de tensão com deformação relativamente baixa, e regiões de quedas em sua capacidade resistente. Esse

comportamento contrasta com o observado em paredes similares construídas com blocos de concreto estrutural, que demonstram maior capacidade de deformação e ruptura mais progressiva. Segundo Lourenço (2006) e Portella (2015), essa diferença está relacionada à porosidade, ao tipo de ligação entre os blocos e à qualidade da interface bloco-argamassa. Assim, paredes de blocos cerâmicos tendem a apresentar menor ductilidade e menor energia dissipada até a ruptura.

4.3.4.2 Deslocamento

Nas Figuras 69 a 74, apresentam-se os gráficos de deslocamento obtidos a partir do monitoramento de quatro etiquetas posicionadas na superfície das pequenas paredes. Esses dados permitem avaliar a distribuição e a evolução dos deslocamentos durante a aplicação da carga, evidenciando o comportamento estrutural das amostras ensaiadas.

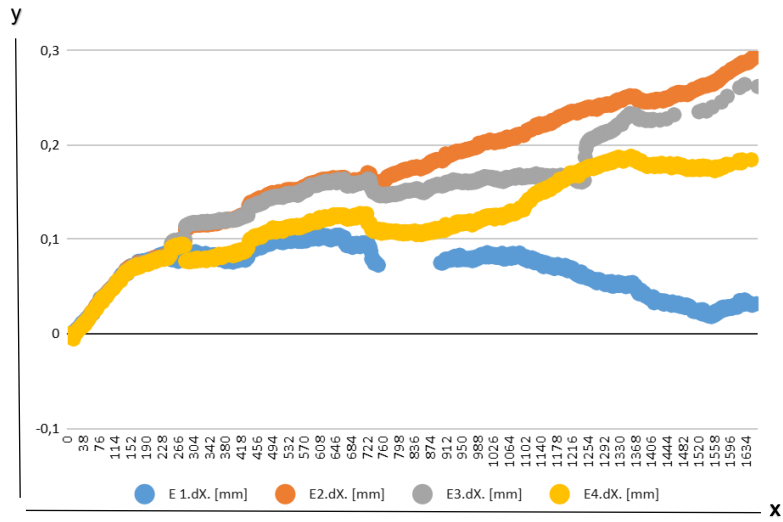


Figura 69 - Deslocamento em (x): Mini Parede 1.

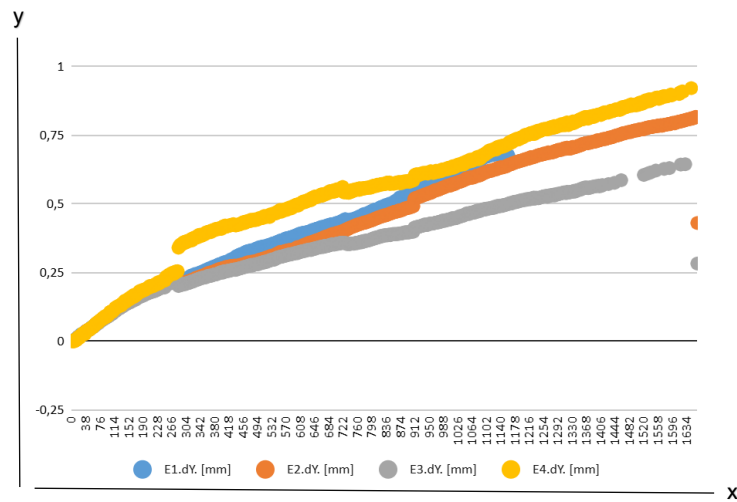


Figura 70 - Deslocamento em (y): Mini Parede 1.

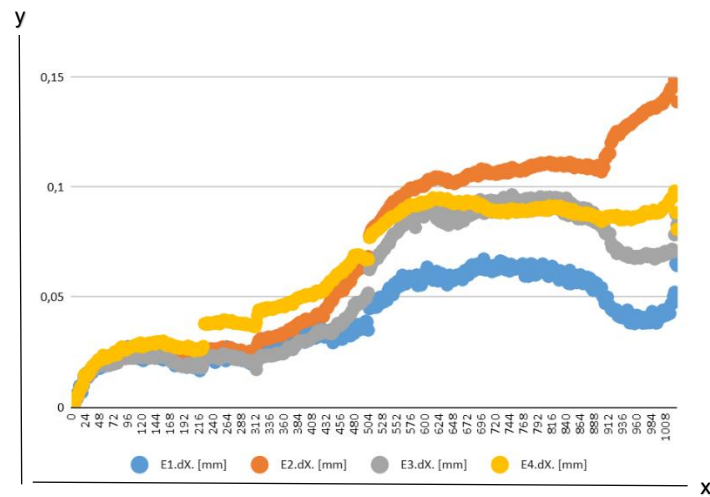


Figura 71 - Deslocamento em (x): Mini Parede 2.

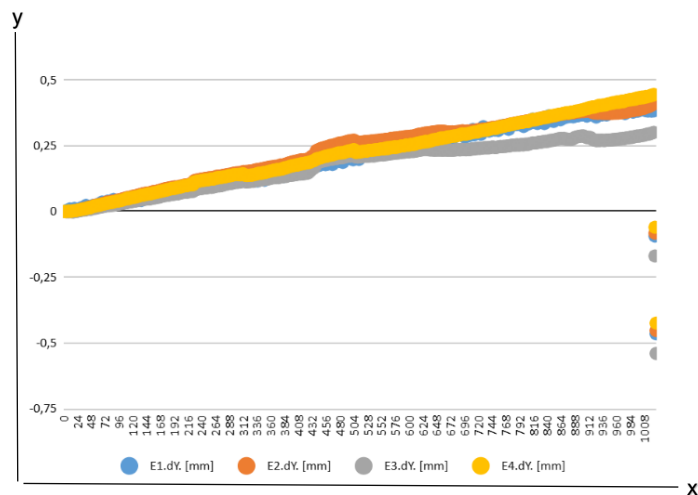


Figura 72 - Deslocamento em (y): Mini Parede 2.

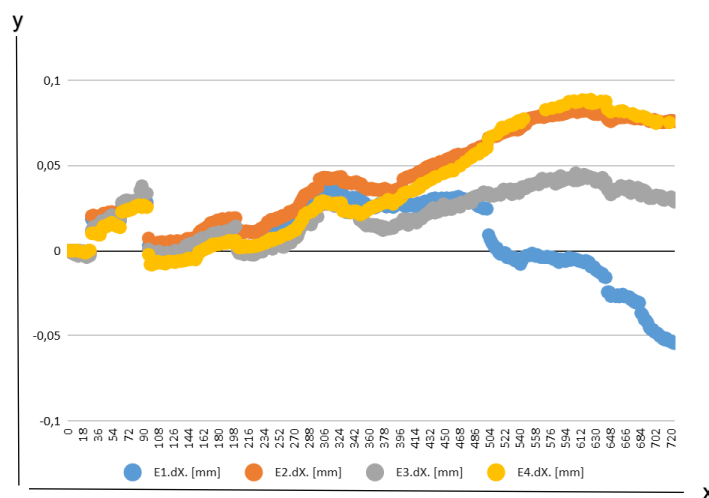


Figura 73 - Deslocamento em (x): Mini Parede 3.

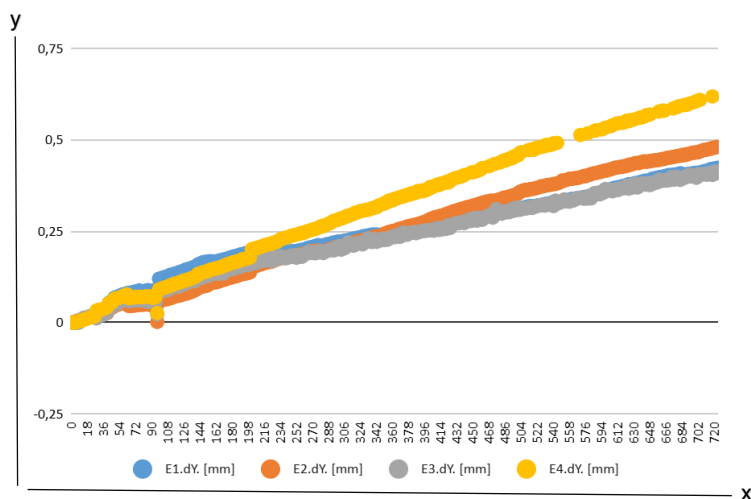


Figura 74 - Deslocamento em (y): Mini Parede 3.

Os gráficos apresentam o deslocamento vertical e horizontal para as três pequenas paredes ao longo do ensaio, nos pontos identificados como E1, E2, E3 e E4. O eixo (x) representa a evolução do ensaio, variando em segundos. Observa-se que todos os corpos de prova exibem um aumento quase linear do

deslocamento, com pequenas variações iniciais possivelmente associadas à fase de acomodação das unidades cerâmicas, especialmente relevante devido à ausência de argamassa. Entre as estruturas analisados, E4 apresenta o maior deslocamento final ($\sim 0,62$ mm), indicando concentração de tensões nas juntas, devido ao contato irregular (não perfeito) entre os blocos. A pp 3 em E3 apresenta o menor deslocamento ($\sim 0,42$ mm), sugerindo maior rigidez estrutural e melhor alinhamento das unidades.

Esta comparação evidencia a variabilidade de deformação entre as estruturas construídas com blocos cerâmicos estruturais sem argamassa, destacando a influência do alinhamento e da integridade superficial na rigidez global da estrutura.

4.3.4.3 Redução de Espessura das Paredes

A redução de espessura é um fenômeno diretamente relacionado à deformação transversal que ocorre em elementos submetidos à compressão axial, como blocos cerâmicos e pequenas paredes, o efeito *Poisson* é responsável pela redução de espessura na direção transversal ou horizontal. Durante o carregamento, além do encurtamento na direção da carga, o material pode apresentar uma diminuição em sua espessura lateral, refletindo sua resposta mecânica tridimensional.

Esse comportamento está associado às propriedades físicas do material, como a módulo de elasticidade transversal, resistência à compressão e capacidade de absorção de energia. A análise da redução de espessura ao longo do tempo fornece informações importantes sobre a evolução da deformação, o início de microfissuração interna e o eventual colapso estrutural de regiões específicas do elemento analisado.

As Figuras 75 a 77 evidenciam a redução de espessura em função do tempo. Na Figura 75, observa-se que a etiqueta quatro (amarela) apresenta um aumento de espessura, o que pode ser atribuído à heterogeneidade dos blocos cerâmicos e às imperfeições presentes em suas superfícies.

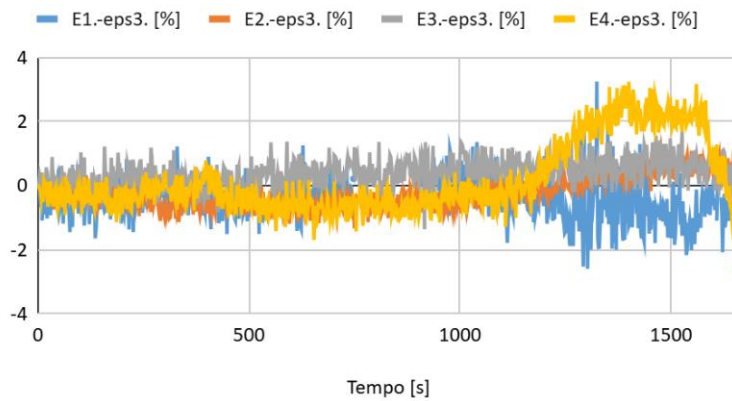


Figura 75 - Gráfico de redução de espessura (pequena parede 1).

Na Figura 76, observam-se variações consistentes nas leituras das etiquetas 4 (amarela), 1 (azul) e, com maior intensidade, da etiqueta 3 (cinza). Nota-se uma redução mais acentuada da espessura nas regiões correspondentes às etiquetas 1 e 3, o que indica concentração de deformações localizadas nessas áreas. Essa redução é representada por valores negativos, em função da aplicação da carga de compressão axial, característica típica do processo de esmagamento sob carregamento vertical.

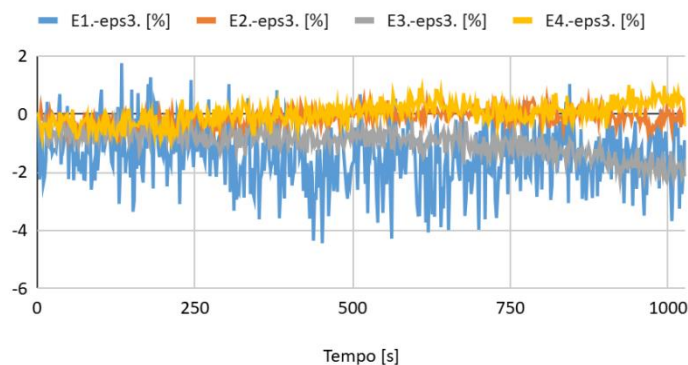


Figura 76 - Gráfico de redução de espessura (pequena parede 2).

Na Figura 77, observam-se variações mínimas na espessura ao longo do tempo, indicando que as etiquetas monitoradas mantiveram-se relativamente estáveis durante a aplicação da carga. Esse comportamento sugere uma região com menor concentração de tensões e deformações, possivelmente associada a uma distribuição mais uniforme dos esforços.

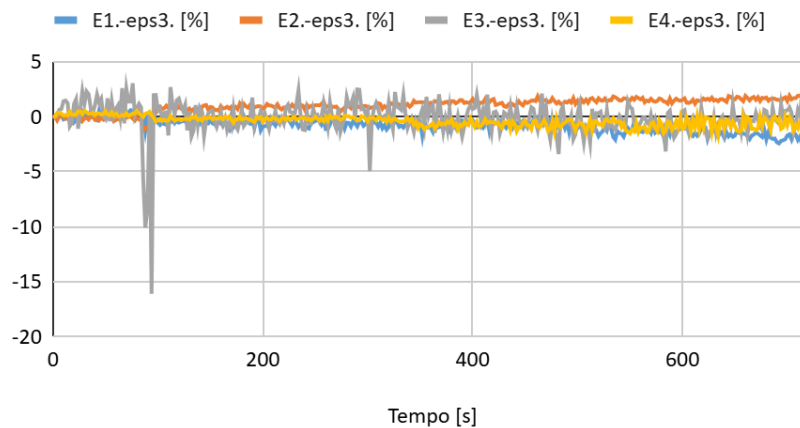


Figura 77 - Gráfico de redução de espessura (pequena parede 3).

4.3.5 Modo de Ruptura das Pequenas Paredes

As pequenas paredes cerâmicas apresentam padrões de ruptura semelhantes aos verificados nos prismas. Foram observados comportamentos distintos de ruptura, evidenciando a resposta típica de materiais frágeis como a cerâmica. A seguir, são destacados os comportamentos ocorridos com a estrutura ao longo dos ensaios. A Figura 78 mostra as regiões onde se concentram os maiores efeitos da carga compressiva.

- Ruptura por trinca vertical central: O primeiro modo de falha identificado foi a formação de uma fissura longitudinal ao longo do eixo vertical das pequenas paredes, a Figura 76 mostra a fissura por meio de marcações. Esse tipo de ruptura é característico de tensões de tração que surgem mesmo sob carregamento predominantemente compressivo, sendo resultado da baixa resistência à tração do material.
- Esmagamento dos Blocos: O segundo tipo de falha envolveu o desprendimento de porções laterais das pequenas paredes, devido ao esmagamento dos blocos. Os blocos tendem a expandir para regiões não confinadas, essa expansão transversal pode gerar tensões internas superiores, ocasionando o deslocamento de fragmentos cerâmicos nas faces laterais.



Figura 78 - Ruptura da Pequena Parede.

4.3.6 Comparação das Pequenas Paredes com Prismas e Blocos

A comparação entre os modos de ruptura observados em prismas e em pequenas paredes evidencia diferenças relevantes no comportamento estrutural da alvenaria. Enquanto os prismas tendem a apresentar um modo de falha mais concentrado, geralmente caracterizado pelo esmagamento localizado dos blocos ou pela fissuração vertical devido ao efeito de Poisson, as pequenas paredes exibem um padrão de colapso mais distribuído e progressivo, marcado por fissuração generalizada, deslocamentos diferenciais e perda de estabilidade associada ao aumento da esbelteza. Essa distinção está diretamente relacionada ao fato de que os prismas possuem geometria mais simples, menor número de juntas e menor sensibilidade a imperfeições construtivas, enquanto as pequenas paredes acumulam efeitos de alinhamento, heterogeneidade de juntas e variações na rigidez entre fiadas.

O comportamento mecânico fica ainda mais evidente na análise dos gráficos de tensão \times deformação. De maneira geral, os prismas apresentam uma curva mais estável, com trecho inicial aproximadamente linear, seguido por um patamar de não-linearidade gradual até atingir a resistência máxima. Já nas pequenas paredes, a resposta é menos rígida e mais irregular: a fase elástica é curta, a não-linearidade começa em níveis baixos de tensão e a queda pós-pico ocorre de forma brusca, indicando maior sensibilidade à instabilidade global e à propagação rápida de fissuras. Esse comportamento reflete a influência

simultânea da geometria mais alta (maior índice de esbeltez), da maior quantidade de interfaces entre os blocos e das imperfeições de encaixe que se acumulam ao longo da parede.

A diferença de capacidade resistente entre os elementos ensaiados confirma essa tendência: os blocos isolados apresentaram os maiores valores de resistência, seguidos pelos prismas, enquanto as pequenas paredes demonstraram a menor capacidade resistente entre os três elementos. Essa redução é esperada e está amplamente documentada na literatura internacional, pois a resistência da alvenaria não é simplesmente a resistência do bloco, mas o resultado da interação entre blocos e sua geometria.

Assim, a comparação entre os elementos demonstra que, embora os prismas já apresentem comportamento distinto dos blocos isolados, as pequenas paredes representam uma condição estrutural mais crítica, onde efeitos geométricos, construtivos e de interação entre os blocos tornam o mecanismo de ruptura mais complexo e reduzem significativamente a resistência. Esse conjunto de fatores reforça a importância de considerar não apenas propriedades dos blocos, mas também os efeitos globais da alvenaria — como esbeltez, detalhamento das juntas e qualidade de execução, para então avaliar de forma realista a capacidade resistente e a segurança da estrutura.

4.4 MODELAGEM NUMÉRICA

No presente estudo, a modelagem numérica adotou um modelo constitutivo linear elástico, selecionado em função do caráter exploratório da pesquisa e da ausência de parâmetros experimentais consolidados que permitissem a calibração de modelos mais avançados. Dessa forma, os blocos cerâmicos extrudados, prensados e queimados (BCEPQ) foram representados como um material homogêneo e isotrópico, cuja resposta mecânica é definida apenas pelos parâmetros de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson determinados experimentalmente nos ensaios de prismas e blocos individuais. A análise linear elástica permitiu estimar a distribuição inicial de tensões, identificar regiões de concentração de esforços e reconhecer pontos críticos da estrutura, sobretudo nas zonas onde a expansão lateral gerada pela compressão axial tende a superar a coesão transversal do material. Ainda que não represente o

comportamento pós-fissuração ou fenômenos não lineares típicos de materiais frágeis, essa abordagem mostrou-se adequada para mapear tendências de comportamento e compreender os mecanismos iniciais associados às rupturas observadas em laboratório. Cabe ressaltar que o modelo numérico não foi validado, uma vez que sua construção teve finalidade exclusivamente exploratória, dada a inexistência de subsídios experimentais suficientes para garantir a aderência rigorosa entre a simulação e o comportamento real das pequenas paredes.

Os resultados numéricos foram comparados dados experimentais, permitindo avaliar a coerência do modelo, identificar eventuais divergências e propor ajustes capazes de melhorar a precisão das previsões. Com isso, este capítulo reforça a integração entre a investigação experimental e a modelagem computacional, contribuindo de forma significativa para a compreensão do desempenho dos BCEPQ quando submetidos a diferentes tipos de carregamento, além de fornecer subsídios técnicos para sua aplicação segura e racional em sistemas de alvenaria estrutural e contribuir para o cenário da Engenharia Civil.

4.4.1 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas listadas na Tabela 17 representam uma base essencial para a construção do modelo numérico. Esses valores servem como parâmetros de entrada indispensáveis, contribuindo para a fidelidade e a consistência dos resultados obtidos por meio das simulações computacionais. A adequada definição desses parâmetros garante que o modelo seja capaz de reproduzir o comportamento dos BCEPQ nas condições de carregamento estabelecidas, favorecendo uma correlação mais sólida entre os dados experimentais e as respostas numéricas previstas.

Tabela 17 - Propriedades Mecânicas.

| Material | Módulo de Elasticidade (MPa) | Resistência à Compressão (MPa) | Coefficiente de <i>Poisson</i> |
|----------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Bloco Cerâmico | 2916 | 4,86 | 0,15 |

4.4.2 Modelagem Numérica da Pequena Parede

A pequena parede foi modelada no software através da união de blocos inteiros e meia-blocos (Figura 79), com o objetivo de garantir o adequado encaixe na estrutura, proporcionando maior estabilidade quando submetida a cargas estáticas.

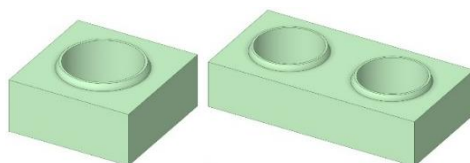


Figura 79 - Blocos e meio blocos modelados.

Após a definição de cada elemento da estrutura, a pequena parede (pp) foi construída conforme a Figura 80, a estrutura possui 11 fiadas. Não se utilizou chapa metálica no topo da parede.

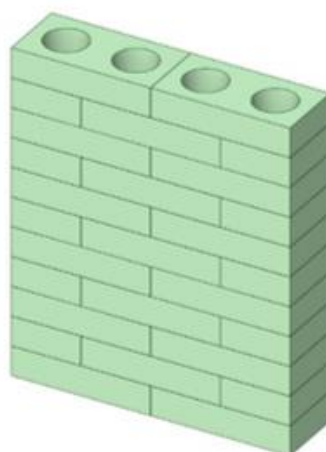


Figura 80 - Pequena Parede.

Foi adotada uma abordagem de micromodelagem detalhada para obter os resultados, cada conexão entre os blocos foi considerada, com o objetivo de representar de forma fiel o comportamento da estrutura sob condições de carregamento. O modelo numérico empregado nas etapas subsequentes é constituído por um total de 588.360 nós.

Para a realização das simulações numéricas no software *ANSYS*, foram definidos previamente os dados de entrada necessários à modelagem. As propriedades mecânicas dos materiais empregados foram definidas a partir de valores característicos. Para o bloco cerâmico estrutural, adotou-se módulo de

elasticidade de 2916 MPa, coeficiente de Poisson de 0,15 e densidade de 1.800 kg/m³. A discretização da geometria foi realizada utilizando elementos sólidos tridimensionais (*Workbench*), com malha predominantemente hexaédrica, conforme mostra a Figura 81, sendo a malha refinada nas regiões de contato entre blocos, de modo a melhorar a precisão dos resultados.

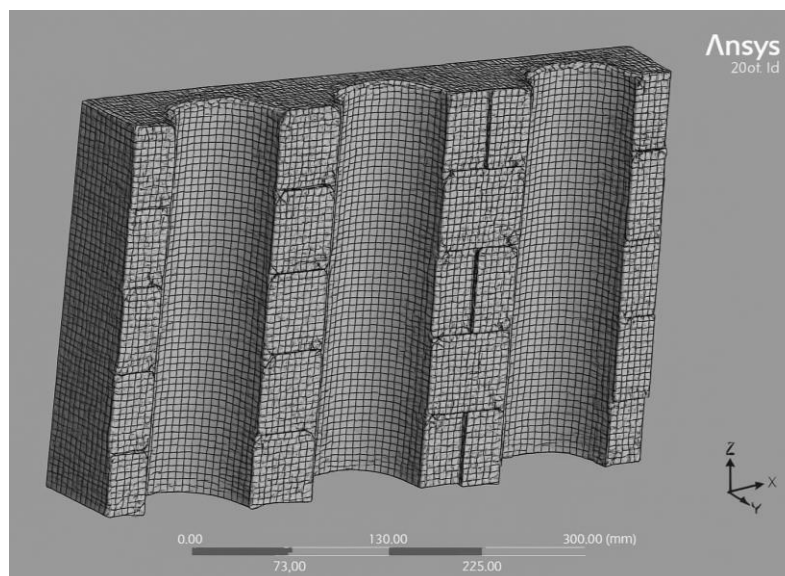


Figura 81 - Disposição das malhas.

As condições de contorno foram impostas com a base e o topo da parede completamente engastados, restringindo-se todos os graus de liberdade.

4.4.2.1 Simulação Utilizando Cargas Estáticas

Após a modelagem da pequena parede no software, a estrutura foi submetida à aplicação de cargas estáticas (Figura 82). A análise resultante, representada por faixas coloridas, evidencia as regiões que experimentaram maior intensidade de tensões e deformações devido ao carregamento imposto. Esses efeitos manifestam-se como deslocamentos distribuídos ao longo da estrutura, permitindo identificar as zonas de maior suscetibilidade à concentração de esforços.

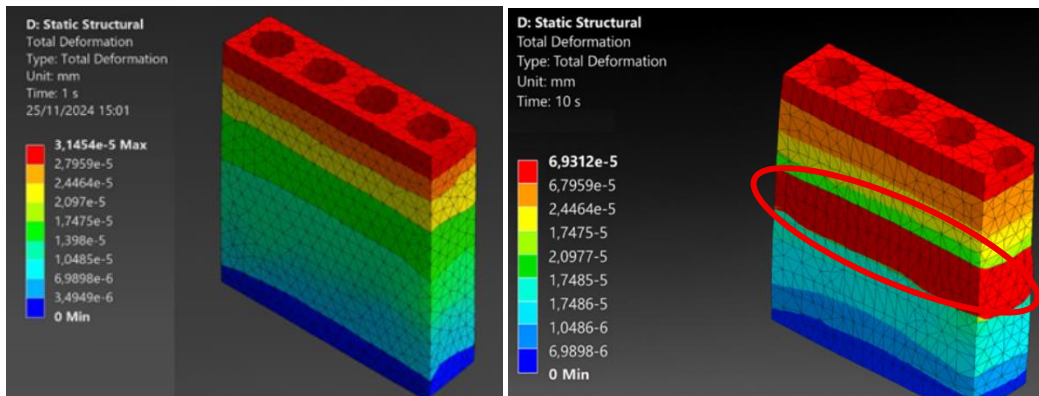


Figura 82 - (a) Deformação com carga baixa (500N); (b) Deformação com carga alta (50kN)

A deformação apresentada na Figura 82(a) ocorre predominantemente na região superior da estrutura, resultado da superfície de contato onde a carga é inicialmente aplicada. Por outro lado, a Figura 82(b) corresponde a uma simulação com maior tempo de carregamento e aplicação de uma carga significativamente superior, de 50 kN. Nessa condição, observa-se que a deformação concentra-se majoritariamente na região central da estrutura, onde os efeitos do carregamento foram mais intensos.

Conforme ilustrado na Figura 83, a máxima concentração de tensões foi verificada na região inferior esquerda da pequena parede, com subsequente redistribuição em direção ao núcleo da estrutura. Adicionalmente, observa-se a formação de tensões na parte inferior da estrutura, as quais são fundamentais para o equilíbrio estático do sistema.

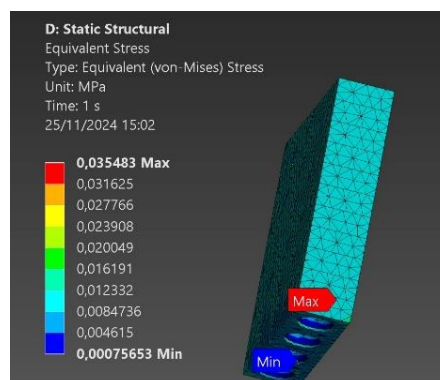


Figura 83 - Tensão da estrutura após carregamento estático.

Essa observação está em linha com estudos numéricos e experimentais que analisam paredes de alvenaria de blocos cerâmicos modeladas por elementos finitos. No estudo de Martínez e Atamturktur (2025) sobre o comportamento de sistemas intertravados sem argamassa, os autores constataram que a maioria das tensões críticas se concentra nas regiões

inferiores próximas aos apoios e interfaces, devido à combinação do peso próprio com carregamentos adicionais, seguido de redistribuição estrutural.

4.4.3 Análise Comparativa Experimental e Numérica

No presente estudo, ambos os métodos foram aplicados a pequenas paredes compostas por blocos cerâmicos estruturais extrudados e prensados, utilizando a mesma configuração tanto nas paredes experimentais quanto no modelo numérico. As áreas de maior concentração de tensões foram consistentemente localizadas nas mesmas faixas da parede, especialmente nas bordas inferiores e próximas ao centro da altura, que correspondem a pontos críticos para a estabilidade estrutural sob compressão.

Adicionalmente, a análise dos modos de deformação indicou padrões semelhantes de redistribuição de esforços, validando a capacidade da modelagem numérica em reproduzir a complexidade do comportamento estrutural das pequenas paredes cerâmicas. Entretanto, algumas diferenças sutis foram observadas, atribuídas principalmente à presença de imperfeições naturais e variações locais de material que são inerentes aos ensaios físicos e difíceis de modelar com precisão absoluta.

A Figura 84 evidencia os valores encontrados para a tensão de ruptura experimentalmente e por meio da modelagem numérica. A comparação entre os valores de tensão de ruptura revelou que a simulação apresentou valores aproximadamente 20% superiores aos observados nos ensaios, evidenciando uma diferença significativa. Esse comportamento é atribuído, principalmente, às idealizações inerentes ao processo de modelagem por elementos finitos. No modelo numérico, as geometrias foram consideradas perfeitas, com faces planas e alinhamento preciso, eliminando imperfeições construtivas presentes nas paredes reais.

Conforme apontado por Lourenço (1996), nas simulações numéricas as condições de contorno e de aplicação de carga são geralmente definidas de maneira uniforme e controlada, contrastando com os ensaios experimentais, nos quais podem ocorrer excentricidades e concentrações localizadas de tensões. As propriedades mecânicas dos blocos cerâmicos foram tratadas como homogêneas, sem considerar variações locais de resistência ou rigidez, nem a presença de microfissuras pré-existentes, comuns em materiais frágeis. Essas

simplificações resultaram em uma superestimação da capacidade resistente, fenômeno já relatado na literatura para modelagens de alvenaria estrutural, com diferenças típicas entre 10% e 25% em relação aos valores experimentais (Loura *et al.*, 2020).

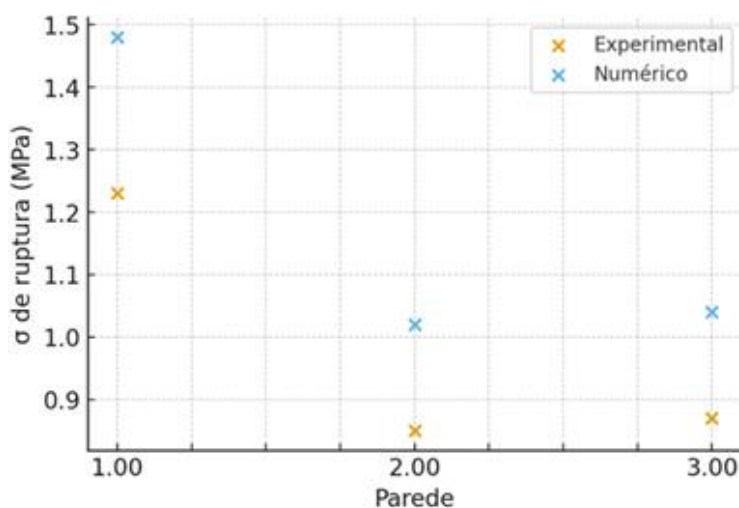


Figura 84 - Gráfico comparativo entre ruptura experimental e numérica.

Embora o modelo geométrico e a formulação constitutiva tenham sido mantidos, pequenas variações numéricas como: diferenças em condições de contorno, aplicação de carga, parâmetros de contato e discretização da malha provocaram a dispersão observada. Em particular, a maior resistência numérica da parede 1 indica uma diferença localizada na distribuição de tensões (apoio, malha ou contato), enquanto as paredes 2 e 3 apresentaram comportamento consistente entre si.

4.4.4 Simulação Utilizando Cargas Dinâmicas

Não foi aplicada carga externa, uma vez que o estudo teve como foco a análise modal da estrutura. Para essa etapa, empregou-se o método de extração de autovalores de *Lanczos*, determinando-se os seis primeiros modos de vibração, com a expansão modal ativada para possibilitar a visualização detalhada das deformadas. Inicialmente, realizou-se a análise modal visando identificar as principais características dinâmicas da estrutura, obtendo-se as frequências naturais e as respectivas formas modais. Os valores obtidos para os seis modos de vibração estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 18 - Frequências naturais.

| Modo | Frequência Natural (Hz) |
|------|-------------------------|
| 1 | 191,3 |
| 2 | 287,5 |
| 3 | 316,8 |
| 4 | 382,7 |
| 5 | 398,4 |
| 6 | 454,9 |

Essas frequências correspondem aos valores nos quais a estrutura tende a vibrar naturalmente, na ausência de excitação externa contínua. Por exemplo, o primeiro modo de vibração ocorre aproximadamente a 191,3 Hz, enquanto o sexto modo ocorre a 454,9 Hz. A identificação dessas frequências é essencial para caracterizar o comportamento dinâmico da estrutura, possibilitando a avaliação de sua resposta a diferentes excitações e a prevenção de fenômenos indesejados, como a ressonância.

Cada modo possui uma possível causa de ativação, a seguir é descrito de forma topicalizada, sobre os seis modos analisados.

- Modo 1 - Vento, vibração de solo e cargas lentas;
- Modo 2 - Máquinas com componentes verticais;
- Modo 3 - Vibrações específicas em partes superiores;
- Modo 4 – Maquinário de alta frequência, impacto local;
- Modo 5 – Ressonância com equipamentos industriais;
- Modo 6 – Vibrações concentradas, excitações de alta energia.

As Figuras 85 a 86 apresentam as regiões de maiores deformações da pequena parede, suscetível aos modos de vibrações citados acima.

A Figura 85 apresenta uma vibração simétrica, com máxima deformação no centro da parede. Como as bordas e a base são fixas, apresentam regiões de deslocamento quase nulo.

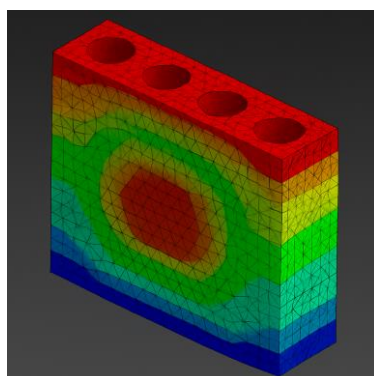


Figura 85 - Deformações no modo 1.

O padrão de deslocamento da Figura 86 é verticalmente alongado, indicando uma deformação geralmente ligada à flexão vertical. Tal comportamento foi também evidenciado por Fernandes e Souza (2019), que observaram em suas análises experimentais e numéricas que modos iniciais tendem a apresentar deformações flexurais gerais.

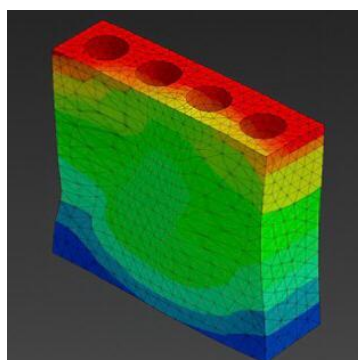


Figura 86 - Deformações no modo 2.

Na Figura 87 há uma região de concentração de deslocamento próximo ao topo. O comportamento vibratório já apresenta variações mais localizadas, indicando modos de flexão lateral ou torcional. Essa característica é similar ao descrito por Costa e Martins (2017), que destacam que modos superiores exibem maior complexidade espacial e deslocamentos localizados.

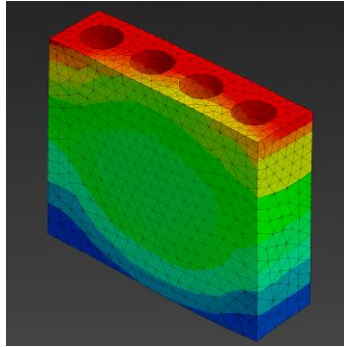


Figura 87 – Deformações no modo 3.

A Figura 88 (a), (b) e (c) correspondem, respectivamente, aos modos de vibração 4, 5 e 6. Observa-se que esses modos apresentam padrões de deformação com distribuições espaciais semelhantes, indicando comportamento vibratório recorrente nas regiões analisadas. Barbosa e Lima (2020) também relataram, em suas simulações, que modos elevados são marcados por distribuição espacial fragmentada e intensificação das tensões localizadas, reforçando a necessidade de análise detalhada para identificar regiões críticas dinâmicas.

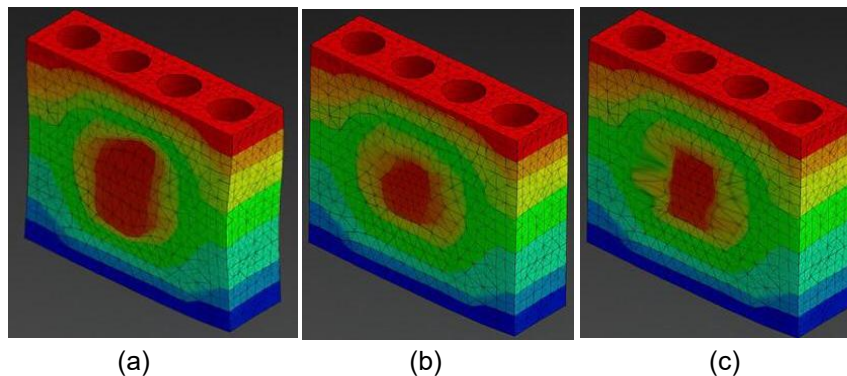


Figura 88 - (a) modo 4, (b) modo 5 e (c) modo 6.

O modo 4 apresenta zonas alternadas de compressão e tração, mais nítidas no miolo da estrutura. Já no modo 5 a região central sofre concentração intensa de deslocamento (em vermelho), mesmo que seja em uma menor região, e os cantos permanecem estáveis. Por fim, no modo 6 a vibração é ainda mais complexa, com diversas zonas alternadas, formando múltiplos modos locais de deformação.

4.4.2.3 Vibração Aleatória

A *Random Vibration*, ou Vibração Aleatória analisa como a estrutura responde a excitações estocásticas, ou seja, carregamentos que variam com o tempo de forma aleatória.

Na Figura 89 destacam-se os deslocamentos RMS estimados (milímetros) para cada modo de vibração da parede, considerando apenas vibração de máquinas industriais, com espectro mais concentrado e intensidade realista. O software fornece os valores para cada modo verificado separadamente, após isso, coletou-se os dados e foi criado o gráfico abaixo.

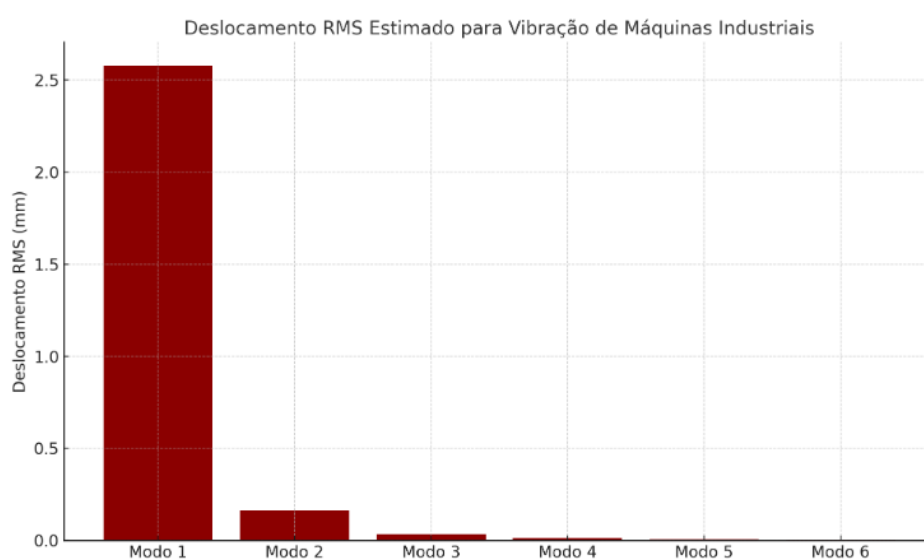


Figura 89 - Deslocamentos RMS.

A análise revelou que o modo fundamental (modo 1) é predominante na resposta estrutural diante de vibrações aleatórias induzidas por máquinas. Os valores máximos de deslocamento e tensão RMS concentram-se no centro da parede, indicando um risco moderado de fadiga a longo prazo. Esses resultados são essenciais para o dimensionamento, reforço estrutural e avaliação da durabilidade do sistema construtivo.

A Figura 90 apresenta o mapa de tensões equivalentes (RMS) resultante da simulação dinâmica no domínio da frequência, considerando a excitação vibratória no primeiro modo natural de vibração da parede estrutural cerâmica. A análise foi conduzida por meio de simulação numérica utilizando o método dos elementos finitos, com excitação representando vibrações aleatórias típicas de ambientes industriais, cuja contribuição principal provém do modo 1.

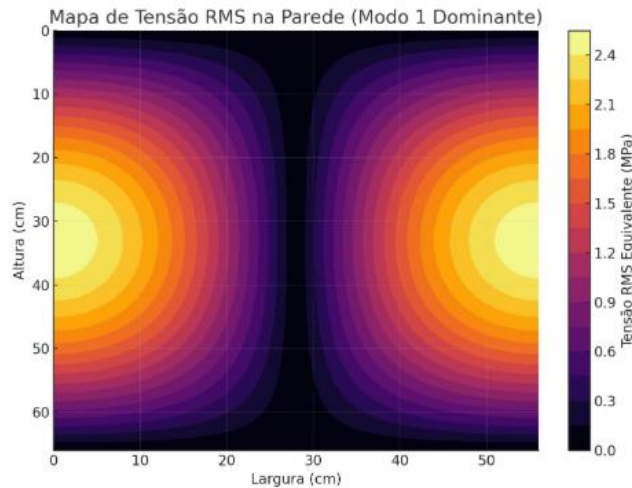


Figura 90 - Mapa de tensão RMS.

Observa-se que os valores máximos de tensão RMS se concentram em regiões intermediárias de altura, aproximadamente entre 20 cm e 40 cm, e nas bordas laterais da parede. Esses pontos coincidem com as regiões de maior amplitude de deslocamento observadas no modo fundamental de vibração, o que é coerente com a relação entre tensão dinâmica e deformações associadas aos modos vibratórios. Esse comportamento está alinhado com os achados de Silva e Oliveira (2018), que observaram concentrações similares de tensões dinâmicas em regiões de maior deformação em paredes de alvenaria submetidas a excitações vibratórias.

O padrão da distribuição de tensões ao longo da largura indica que o comportamento dinâmico da parede é predominantemente bidimensional, refletindo uma excitação bem distribuída e uma estrutura com simetria geométrica e de condições de contorno. As zonas centrais (em torno da linha vertical no centro da parede) apresentam valores mínimos de tensão.

Os valores de tensão RMS atingem até aproximadamente 2,4 MPa, o que representa um nível de sollicitação significativo sobre o material cerâmico, especialmente considerando sua natureza frágil e suscetibilidade à falha sob esforços cíclicos. Fernandes e Souza (2019), enfatizam a suscetibilidade à fadiga e falha em alvenarias cerâmicas submetidas a esses tipos de esforços. Esta informação é crucial para a avaliação da vida útil da alvenaria estrutural em situações de serviço sujeitas a vibrações, como em instalações industriais ou próximas a fontes de excitação mecânica.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo investigar o desempenho estrutural de blocos cerâmicos extrudados, prensados e queimados por meio de análises experimentais e numéricas, considerando diferentes condições de carregamento. Foram avaliados blocos isolados, prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural, com foco na resposta sob cargas estáticas (experimentalmente) e sob ações estáticas e dinâmicas (numericamente).

Os ensaios de compressão realizados permitiram identificar os modos de ruptura predominantes nos elementos analisados, bem como caracterizar sua resistência mecânica. Os resultados obtidos experimentalmente forneceram resultados comparativos satisfatórios em relação a estudos encontrados na literatura e normas. A modelagem numérica, desenvolvida no software ANSYS, possibilitou a simulação de diferentes cenários de carregamento, incluindo condições dinâmicas representativas de vibrações induzidas por máquinas e excitações aleatórias. A análise modal evidenciou as frequências naturais mais relevantes da estrutura, enquanto a simulação sob cargas dinâmicas revelou regiões críticas de concentração de tensões e deformações. Cabe ressaltar que não foi executado ensaio dinâmico experimental na pequena parede devido às limitações de infraestrutura e à inexistência de instrumentação apropriada para a aplicação controlada de cargas vibratórias.

A comparação entre as regiões mais suscetíveis a deformações realizadas experimentalmente e numericamente, permitiu verificar uma semelhança entre os locais de deformações e fissuras. Embora não tenha sido realizada uma comparação direta e sistemática entre os dados experimentais e os resultados numéricos da análise dinâmica, foi possível observar potenciais áreas de estudo para representar adequadamente o comportamento estrutural da alvenaria cerâmica, sendo uma ferramenta promissora para estudos futuros de validação e calibração.

Os resultados obtidos nesta pesquisa forneceram *insights* sobre o comportamento de pequenas paredes submetidas a carregamento estático. Uma análise metódica dos dados indicou que as paredes, modeladas com blocos de alvenaria estrutural, apresentaram um desempenho excepcionalmente eficiente. Observou-se uma distribuição de tensão

consideravelmente mais uniforme, além de uma resistência superior à deformação em comparação com estruturas convencionais.

Por meio das simulações numéricas e dos ensaios laboratoriais realizados, foi possível identificar as regiões de maior suscetibilidade e os pontos críticos da estrutura, contribuindo para o aprofundamento da compreensão dos mecanismos de falha envolvidos. Cabe destacar que o modelo numérico desenvolvido não passou por um processo formal de validação, uma vez que sua concepção teve caráter exploratório, não havendo, subsídios suficientes que permitam assegurar a representatividade de um modelo definitivo.

A relevância deste estudo se destaca tanto no campo acadêmico quanto na prática da engenharia civil. Este trabalho possui caráter inédito, o que explica algumas carências de trabalhos na literatura. Do ponto de vista científico, contribui para a ampliação do conhecimento sobre o desempenho de elementos cerâmicos estruturais sob diferentes condições de carga. Já na esfera profissional, os dados obtidos podem subsidiar decisões mais seguras e eficientes no dimensionamento de sistemas construtivos em alvenaria estrutural.

Por fim, a análise dos resultados evidenciou que, embora as normas técnicas brasileiras estabeleçam diretrizes relevantes para a avaliação do desempenho da alvenaria estrutural, ainda apresentam limitações quanto à abrangência e à acurácia dos parâmetros normativos.

5.1 Sugestões para futuras pesquisas

A seguir são listadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a resistência de prismas e pequenas paredes conectadas com argamassa;
- Estudar vibrações, acelerações em pequenas paredes utilizando acelerômetros e mecanismos em laboratório;
- Analisar e comparar blocos extrudados, prensados e queimados de diferentes composições, variando a composição das argilas utilizadas;
- Avaliar o modo de ruptura de paredes mais esbeltas e de diferentes alturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adessi, D.; Marvila, M. T.; Teixeira, P. M. Caracterização do comportamento dinâmico de elementos estruturais de alvenaria danificados. *Civil-Comp*, Praga, 2015.

Alva, Gerson M. S.; Kaminski Jr., Alessandro O.; Rigão, Alessandro O.; Pinheiro, João; Silva, Marco A. Análise sísmica de edifícios de concreto armado com alvenarias participantes. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, 2021.

Associação Brasileira de Cerâmica (ABC). Informações técnicas – definição e classificação, 2016. Disponível em: <http://www.abceram.org.br>. Acesso em: 27 fev. 2023.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Componentes cerâmicos – blocos e tijolos para alvenaria: parte 1 – requisitos*. NBR 15270-1. Rio de Janeiro, 2023.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Alvenaria estrutural: blocos cerâmicos – parte 1: projetos*. NBR 15812-1. Rio de Janeiro, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Alvenaria estrutural: blocos cerâmicos – parte 2: execução e controle de obras*. NBR 15812-2. Rio de Janeiro, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Projeto de estruturas de concreto*. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2023.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Projeto de estruturas resistentes a sismos – procedimento*. NBR 15421:2023. Rio de Janeiro, 2023.

Alva, G. et al. Análise sísmica de edifícios de concreto armado com alvenarias participantes. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. Volume 14. 2021.

ANIL K. Chopra. *Dynamics of Structures*. Global. eDition. 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1984) *Determinação da Massa Específica*. NBR 6508. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 15270-1 - *Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria. Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro. 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 15812-1 – *Alvenaria estrutural. Blocos cerâmicos - parte 1: Projetos*. Rio de Janeiro, 2010.

Associação Brasileira de Cerâmica (ABC). Informações técnicas – definição e classificação, 2016. Disponível em: <http://www.abceram.org.br>. Acesso em: 27 fev. 2023.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Determinação da massa específica*. NBR 6508. Rio de Janeiro, 1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Alvenaria estrutural: blocos cerâmicos – parte 1: projetos*. NBR 15812-1. Rio de Janeiro, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Alvenaria estrutural: blocos cerâmicos – parte 2: execução e controle de obras*. NBR 15812-2. Rio de Janeiro, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Projeto de estruturas de concreto*. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2023.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Projeto de estruturas resistentes a sismos – procedimento*. NBR 15421:2023. Rio de Janeiro, 2023.

Azevedo, A. R. G.; Marvila, M. T.; Zanellato, E.; Cerqueira, N. A.; Pedroti, L. G.; Fernandes, W. J.; Mendes, B. Assessing the potential of sludge generated by the pulp and paper industry in assembling locking blocks. *Journal of Building Engineering*, v. 23, p. 334–340, 2019.

Banks, Jerry; Carson, John S.; Nelson, Barry L.; Nicoletta, David T. *Discrete-Event System Simulation*. 5. ed. Pearson, 2010.

Cerqueira, Niander Aguiar; Mendes, B. C. *Alvenaria estrutural*. Itaperuna: Instituto Begni Ltda., 2018.

Cerqueira, Niander Aguiar; Mendes, B. C.; Pedroti, L. G.; Fernandes, W. J.; Azevedo, A. R. G. Analysis of deformability modulus by linear and nonlinear elastic methods in ceramic structural masonry and mortars. *Cerâmica*, v. 66, p. 229–235, 2020.

Cerqueira, Niander Aguiar; Marvila, M. T.; Pedroti, L. G.; Fernandes, W. J.; Mendes, B. Mechanical feasibility study of pressed and burned red ceramic blocks as structural and sealing masonry. *Materials*, v. 15, n. 14, p. 5004, 2022.

Chen, Da-chuan; Shang, Shou-ping; Zhang, Cheng-qiang. Effect of vertical load difference on cracking behaviors in multistory masonry buildings and numerical simulation. *Journal of Central South University of Technology*, v. 16, n. 6, p. 1014–1021, 2009.

Clough, Ray W.; Penzien, Joseph. *Dynamics of Structures*. 3. ed. Berkeley: Computers & Structures, Inc., 2003.

Craig, Roy R.; Kurdila, Andrew J. *Fundamentals of Structural Dynamics*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

Chandrupatla, T. R.; Belegundu, A. D. *Introduction to Finite Elements in Engineering*. 4. ed. EUA: Pearson, 2012. Disponível em: <http://www.pearsoninternationaleditions.com/chandrupatla>.

Chopra, Anil K. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. 5. ed. Boston: Pearson, 2017.

Chopra, Anil K. *Dynamics of Structures*. Global edition, 2014.

Cruz, J. F. D.; Paccola, R. R. Vibração aleatória em estruturas: uma abordagem estatística. *Revista Matéria*, v. 19, n. 3, p. 2766–2776, 2014.

Demir, Hatice Aysegül. Os desafios e vantagens da modelagem macro no software ansys para avaliação de vulnerabilidade sísmica de estruturas de alvenaria históricas. Departamento de Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia de Izmir, Izmir, Turquia, 2023.

Drysdale, R. G.; Hamid, A. A.; Baker, L. R. *Masonry Structures: Behavior and Design*. 3. ed. Mississauga: The Masonry Society, 2008.

Figueiredo, António; Varum, Humberto; Costa, António; Silveira, Dora; Oliveira, Cristina. Seismic retrofitting solution of an adobe masonry wall. *Materials and Structures*, v. 46, p. 203–219, 2013.

Furukawa, A.; Kiyono, J. Performance comparison of masonry walls with rectangular bricks and interlocking bricks – static loading test and dynamic analysis using DEM. COMPDYN 2023.

Gaspar, A. Oscilações. In: *Física, volume único*. 1º ed. São Paulo: Editora Ática, 2001. p. 179–189.

Gatta, C.; Vestroni, F. Caracterização dinâmica de um sistema com degradação: uma parede de alvenaria. *Sistemas Mecânicos e Processamento de Sinais*, 2021.

Gonçalves, R. F. Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas. Rio de Janeiro, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Huang, He; et al. Análise das características mecânicas de paredes de casa com estrutura de alvenaria sob carga dinâmica. Conferência Internacional sobre Pesquisa Civil, Arquitetura e Meio Ambiente, Zhuhai, China, 2021.

Hibbeler, R. C. Vibrações. In: *Dinâmica: Mecânica para engenharia*. 10ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009. p. 496–520.

Holanda, Francisco A. *Alvenaria Estrutural: Ensaio e Aplicações*. Fortaleza: Imprensa Universitária da UFC, 2008.

Humar, Jag M. *Dynamics of Structures*. Boca Raton: CRC Press, 2012.

Hung-Liang, C.; Surendra, P. Teste de modelo de alvenaria de pilar único sob agitação dinâmica e carregamento cíclico quase estático. Publicação Técnica Especial ASTM. Simpósio de Alvenaria: Materiais, Projeto, Construção e Manutenção. Nova Orleans, 2 dez. 1986.

International Organization for Standardization. *ISO 10137:2007 – Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations*. Geneva: ISO, 2007.

Lafuente, M.; Cruz, M. Proposta de índice de dano local para avaliação da degradação da rigidez em paredes de alvenaria confinadas submetidas a carregamentos cíclicos. Congresso Internacional sobre Métodos Numéricos em Engenharia e Ciências Aplicadas, CIMENICS, 1996.

Lopes, Matheus A. Estudo experimental do comportamento de prismas de alvenaria com blocos cerâmicos estruturais. 2017. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

- Lourenço, P. B. *Computational Strategies for Masonry Structures*. Delft University Press, 1996. 210 p.
- Lourenço, P. B. Experimental and numerical issues in the modeling of the mechanical behavior of masonry. *Structural Analysis of Historical Constructions*, v. 2, p. 57–91, 2006.
- Lin, J.; Wang, Y.; Chen, H. Application of Digital Image Correlation (DIC) in Characterizing the Mechanical Behavior of Porous Ceramic Blocks. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 30, n. 5, p. 4500–4510, 2021. DOI: 10.1007/s11665-021-05678-9.
- Martinez, Pedro Henrique. Influência da geometria de blocos cerâmicos no comportamento de vigas paredes de alvenaria estrutural. 2017.
- Martínez, A.; Atamturktur, B. Finite element modeling of reinforced dry-stacked concrete masonry walls subjected to out-of-plane loading. *Materials*, v. 15, n. 8, p. 2858, 2025. MDPI. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/8/2858>. Acesso em: [data].
- Marvila, M. T. Correlation between the properties of structural clay blocks obtained by destructive tests and Ultrasonic Pulse Tests. *Journal of Building Engineering*, v. 26, p. 100869, 2019.
- Mendola, L.; Papia, M.; Zingone, G. Estabilidade de paredes de alvenaria sujeitas a forças sísmicas transversais. *Revista de Engenharia Estrutural*, v. 121, 1995.
- Meirovitch, Leonard. *Fundamentals of Vibrations*. Boston: McGraw-Hill, 2001.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- Milani, A. S. (2021). *Experimental investigation of small-scale clay blocks / case studies on mechanical behaviour of masonry components* (artigo/programa experimental).
- Montgomery, Douglas C.; Runger, George C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- Mohammad, Asad; Zahra, Tatheer; Thamboo, Julian. Modelagem numérica de alvenaria aderida sob carregamento de compressão cíclica. COMPDYN 2021.
- Mohamad, Gihad. *Construções em Alvenaria Estrutural*. 2. ed. ampliada e revisada conforme a NBR 16868/2020. Editora Blusher, 2020.
- Moraes, Y. Análise dinâmica aplicada ao controle de vibrações em protótipo de edifício incorporando molas LMF superelásticas. *Revista Principia*, v. 1, n. 45, p. 90–101, 2019.
- Motamed, R.; Mortazavi, S.; Hatami, F. *Literature Review of the In-Plane Behavior of Masonry Walls: Theoretical vs. Experimental Results*. *Materials*, v. 14, n. 11, p. 3063, 2021.
- Nasser, M. Análise dinâmica de estruturas de alvenaria em estilo arqueado. Conferência Internacional de Análise Modal - IMAC, Reino Unido, 2001.

- Oliveira, D. V.; Lourenço, P. B. Implementation and validation of a constitutive model for the cyclic behaviour of interface elements. *Computers & Structures*, v. 82, n. 17, p. 1451–1461, 2004.
- Partene, E.; Fekete-Nagy, L.; Stoian, V. Evaluation of shear capacity for brick masonry walls. *Journal of Applied Engineering Sciences*, v. 5, n. 18, p. 69–74, 2015.
- Pedroti, L. G.; Cerqueira, N. A.; Marvila, M. T.; Fernandes, W. J.; Mendes, B. Desenvolvimento de massa cerâmica para blocos queimados e prensados. *Cerâmica Industrial*, v. 16, n. 1, p. 25–30, 2011.
- Pfeil, Walter; Pfeil, Miriam. *Alvenaria Estrutural: Materiais, projeto e desempenho*. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003.
- Portioli, F.; Cascini, L. Dinâmica de contato de estruturas de blocos de alvenaria usando programação matemática. *Jornal de Engenharia Sísmica*, 2015.
- Portella, K. F. *Alvenaria estrutural: critérios de projeto, controle e execução*. 2. ed. São Paulo: PINI, 2015.
- Ramos, I. D. S.; Alves, M. D. G.; Alexandre, J. Diagnóstico do polo cerâmico de Campos dos Goytacazes-RJ. *Cerâmica Industrial*, v. 11, n. 1, p. 28–32, 2006.
- Rousseeuw, Peter J.; Hubert, Mia. Anomaly detection by robust statistics. arXiv, 31 jul., ano não informado.
- Santos, Igor Antônio Pereira; et al. Alvenaria estrutural e uma análise comparativa entre blocos cerâmicos e de concreto. 2021.
- Santhi, M. Avaliação da resistência a cargas sísmicas de pórticos de concreto armado preenchidos com alvenaria usando análise dinâmica linear e não linear. *Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 431, 2018.
- Serpilli, M., Cameli, A., & Stazi, F. (2024). *Experimental and Numerical Characterization of the In-Plane Shear Behavior of a Load-Bearing Hollow Clay Brick Masonry System with High Thermal Performance*. *Buildings*, 14(9), 2903. <https://doi.org/10.3390/buildings14092903>.
- Senthil, K.; Thakur, A. Resposta dinâmica transitória de paredes de alvenaria de tijolo sob carga de impacto repetido de baixa velocidade. *Jornal Internacional de Engenharia de Impacto*, 2023.
- Senthil, K. Resistência ao impacto multi-hit de paredes de alvenaria sob grande massa. Artigo de conferência, 2022.
- Soriano, Humberto Lima. *Introdução à dinâmica das estruturas*. São Paulo: Elsevier Editora Ltda., 2014.
- Silva, J. G. S. Análise dinâmica de estruturas considerando diferentes níveis de não linearidade. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 3, n. 2, p. 159–181, 2010.
- Silva, J. G. S.; Ribeiro, E. G. Análise de ruptura em prismas e paredes de alvenaria estrutural com blocos de concreto. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 6, n. 4, p. 611–630, 2013.

Silva, M. D. P. Análise experimental da resistência à compressão de paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos. *Revista Matéria*, v. 21, n. 3, p. 840–856, 2016.

Tauil, C. A.; Nesse, F. J. M. *Alvenaria Estrutural – Metodologia do Projeto, Detalhes, Mão de Obra, Normas e Ensaio*. São Paulo: Pini, 2010.

Trevor, K. Avaliação sísmica de paredes de alvenaria armada. *Engenharia Estrutural em Instalações Nucleares*. Anais da Conferência, 2014.

Vargas, Laura. Seismic behavior of partially grouted masonry shear walls containing openings: experimental testing. 2022. Elsevier.

Vieira, C. M. F.; Holanda, J. N. F. Desenvolvimento de blocos cerâmicos para alvenaria estrutural. *Cerâmica*, São Paulo, v. 60, n. 353, p. 71-77, 2014.

Zhuge, V. Análise dinâmica não linear de alvenaria não armada. *Revista de Engenharia Estrutural*, v. 124, n. 3, 1998.

Zhou, X.; Li, M.; Tang, S. Anisotropic deformation analysis of structural ceramic blocks using DIC technique. *Construction and Building Materials*, v. 278, p. 122334, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122334.

Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. 6. ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

APÊNDICE

APÊNDICE 1 – BLOCOS CERÂMICOS

1.1 Tamanho da Amostra

A Tabela abaixo mostra o número de corpos de prova utilizados em cada ensaio e o número de corpos de prova mínimo exigidos pela norma.

Tabela 19 - Tamanho da amostra.

| Elemento | | Número de CP | Exigência Mínima Normativa |
|----------------|------------|--------------|----------------------------|
| Blocos | CG | 13 | 10 |
| | AA | 6 | 5 |
| | AAI | 6 | 5 |
| | MEA | 6 | 3 |
| | Compressão | 18 | 13 |
| Prisma | Compressão | 12 | 6 |
| Pequena Parede | Compressão | 3 | 3 |

1.2 Análise Dimensional dos Blocos

Tabela 20 - Análise Dimensional.

| Bloco | Medida das faces (mm) | | | Ø (mm) | Ab (mm ²) |
|------------|-----------------------|--------|-------|--------|-----------------------|
| | L | C | H | | |
| B1 | 139,58 | 281,33 | 60,21 | 68,07 | 39268,04 |
| B2 | 140,76 | 282,05 | 62,73 | 71,13 | 39701,36 |
| B3 | 141,04 | 281,08 | 61,06 | 72,01 | 39643,52 |
| B4 | 139,32 | 281,52 | 62,03 | 67,05 | 39221,37 |
| B5 | 140,47 | 281,18 | 61,92 | 72,13 | 39497,35 |
| B6 | 140,59 | 279,22 | 62,02 | 72,4 | 39255,54 |
| B7 | 140,91 | 281,98 | 61,84 | 70,17 | 39733,80 |
| B8 | 141,01 | 281,48 | 60,94 | 71,56 | 39691,49 |
| B9 | 140,83 | 280,42 | 62,63 | 68,04 | 39491,55 |
| B10 | 140,45 | 280,03 | 60,21 | 70,49 | 39330,21 |
| B11 | 139,13 | 281,74 | 62,37 | 73,21 | 39198,49 |
| B12 | 141,23 | 279,11 | 61,01 | 66,63 | 39418,71 |
| B13 | 141,26 | 280,71 | 60,28 | 72,75 | 39653,09 |
| Média | 140,51 | 280,91 | 61,48 | 70,43 | 39469,58 |
| Desv. Pad. | 0,69 | 0,93 | 0,87 | 68,75 | 192,46 |

1.3 Absorção de Água dos Blocos

Tabela 21 - Índice de Absorção de Água NBR 15270-2 (ABNT,2023).

| Bloco | M _u (g) | M _s (g) | AA (%) | Média (%) |
|-------|--------------------|--------------------|--------|-----------|
| 1 | 2791,60 | 3430,80 | 22,90 | 22,83 |
| 2 | 2742,00 | 3373,00 | 23,01 | |
| 3 | 2781,80 | 3410,50 | 22,60 | |
| 4 | 2760,80 | 3390,1 | 22,79 | |
| 5 | 2746,70 | 3373,4 | 22,82 | |
| 6 | 2768,60 | 3402,3 | 22,89 | |

1.4 Massa Específica Aparente

Tabela 22 - Massa Específica Aparente dos Blocos NBR 15270-2 (ABNT, 2023).

| Bloco | Massa (g) | Volume (cm ³) | Massa Específica Aparente (g/cm ³) | Média (g/cm ³) |
|-------|-----------|---------------------------|--|----------------------------|
| 1 | 2791,60 | 2352 | 1,19 | 1,18 |
| 2 | 2742,00 | 2352 | 1,17 | |
| 3 | 2781,80 | 2352 | 1,18 | |
| 4 | 2760,80 | 2352 | 1,17 | |
| 5 | 2746,70 | 2352 | 1,17 | |
| 6 | 2768,60 | 2352 | 1,18 | |

1.5 Resistência à Compressão dos Blocos

Tabela 23 - Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão dos Blocos - NBR15270-2 (ABNT, 2023).

| Blocos | Área Bruta (mm ²) | Área Líquida (mm ²) | F ruptura (N) | σ bruta (N/mm ²) | Média (MPa) |
|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------|------------------------------|-------------|
| 1 | 39200 | 33814,74 | 347840,6 | 8,873 | 7,39 |
| 2 | 39200 | 34241,84 | 298611,4 | 7,618 | |
| 3 | 39200 | 34523,55 | 324991,19 | 8,291 | |
| 4 | 39200 | 33673 | 339406,91 | 8,658 | |
| 5 | 39200 | 33994,61 | 328913,83 | 8,391 | |
| 6 | 39200 | 34037,5 | 345879,28 | 8,823 | |
| 7 | 39200 | 34169,58 | 306554,75 | 7,820 | |
| 8 | 39200 | 34357,61 | 357745,28 | 9,126 | |
| 9 | 39200 | 34134,21 | 360785,33 | 9,204 | |
| 10 | 39200 | 33997,48 | 343035,36 | 8,751 | |
| 11 | 39200 | 33522,65 | 259384,94 | 6,617 | |
| 12 | 39200 | 34499,65 | 323029,87 | 8,241 | |
| 13 | 39200 | 34536 | 347938,66 | 8,876 | |
| 14 | 39200 | 34499,01 | 217601,6 | 4,836 | |
| 15 | 39200 | 34399,65 | 183171,9 | 4,673 | |
| 16 | 39200 | 34432,45 | 155921,9 | 3,978 | |
| 17 | 39200 | 34391,2 | 232692,5 | 5,936 | |
| 18 | 39200 | 34491,62 | 171140,4 | 4,366 | |
| Desvio Padrão | | | | | 1,82 |
| Resistência Característica (fbk) | | | | | 4,86 |

APÊNDICE 2 – PRISMAS

2.1 Resistência à Compressão de Prismas

O prisma (2) marcado em negrito, foi excluído utilizando o critério dos dois desvios-padrão. Portanto, para calcular a média este valor não faz parte.

Tabela 24 - Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão de Prismas - NBR15270-2 (ABNT, 2023).

| n° de prismas | Área Bruta (mm ²) | F ruptura (N) | σ bruta (N/mm ²) | Média |
|---------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------|
| 1 | 39200 | 55150,0 | 1,407 | 1,66 |
| 2 | | 27853,12 | 0,711 | |
| 3 | | 76243,75 | 1,945 | |
| 4 | | 53215,53 | 1,358 | |
| 5 | | 65971,8 | 1,683 | |
| 6 | | 80778,12 | 2,061 | |
| 7 | | 70306,25 | 1,794 | |
| 8 | | 74062,81 | 1,889 | |
| 9 | | 40921,88 | 1,044 | |
| 10 | | 48603,13 | 1,240 | |
| 11 | | 82684,37 | 2,109 | |
| 12 | | 68418,75 | 1,745 | |

2.2 Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson

Tabela 25 - Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson de Prismas.

| n° de prismas | F ruptura (N) | σ bruta (N/mm ²) | Módulo de Elasticidade (MPa) | Coeficiente de Poisson |
|---------------|---------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------|
| 1 | 55150,0 | 1,41 | 844 | 0,15 |
| 2 | 27853,12 | 0,71 | 426 | 0,15 |
| 3 | 76243,75 | 1,94 | 1167 | 0,15 |
| 4 | 53215,53 | 1,36 | 815 | 0,15 |
| 5 | 65971,8 | 1,68 | 1010 | 0,15 |
| 6 | 80778,12 | 2,06 | 1236 | 0,15 |
| 7 | 70306,25 | 1,79 | 1076 | 0,15 |
| 8 | 74062,81 | 1,89 | 1134 | 0,15 |
| 9 | 40921,88 | 1,04 | 626 | 0,15 |
| 10 | 48603,13 | 1,24 | 744 | 0,15 |
| 11 | 82684,37 | 2,11 | 1266 | 0,15 |
| 12 | 68418,75 | 1,75 | 1047 | 0,15 |

2.3 Taxa de Deformação dos Prismas

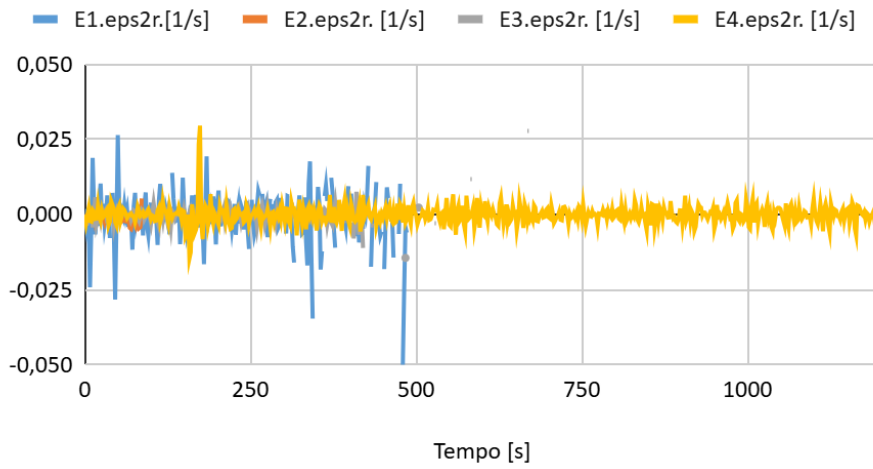


Figura 91 - Tempo(s) vs Velocidade de deformação(1/s): (Prisma 1).

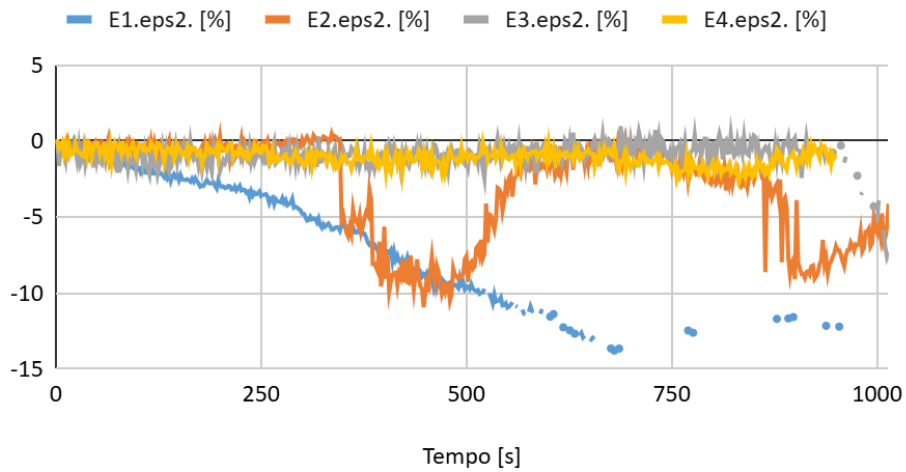


Figura 92 - Tempo(s) vs Velocidade de deformação(1/s): (Prisma 2).

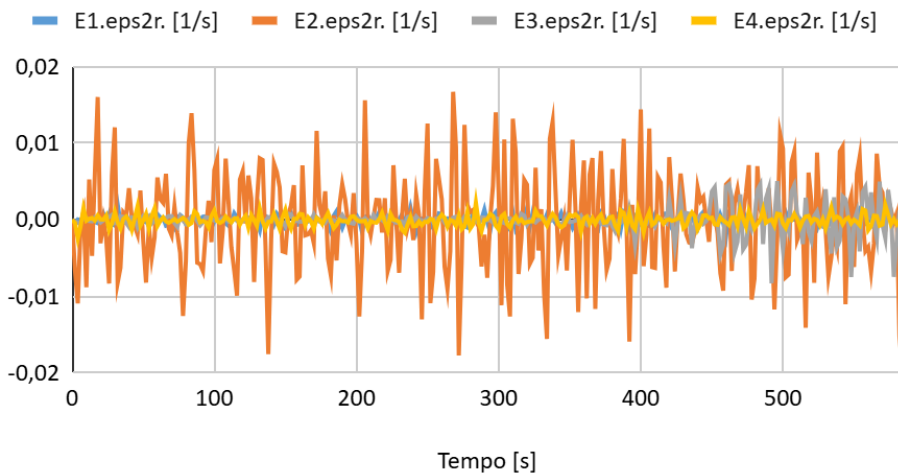


Figura 93 - Tempo(s) vs Velocidade de deformação(1/s): (Prisma 3).

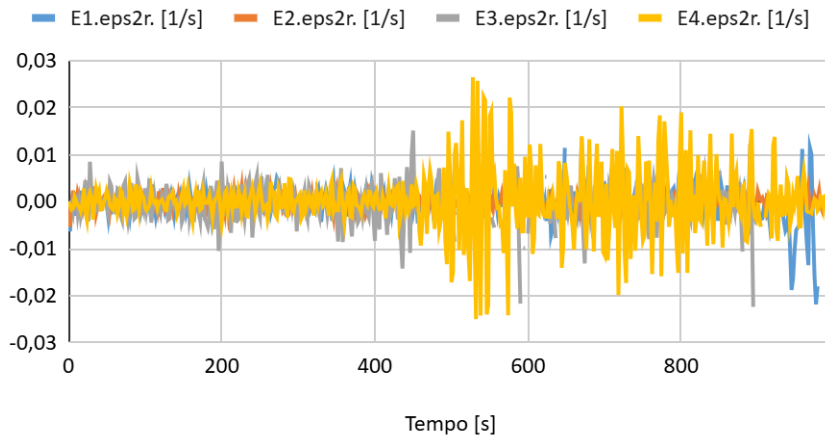


Figura 94 - Tempo(s) vs Velocidade de deformação(1/s): (Prisma 4).

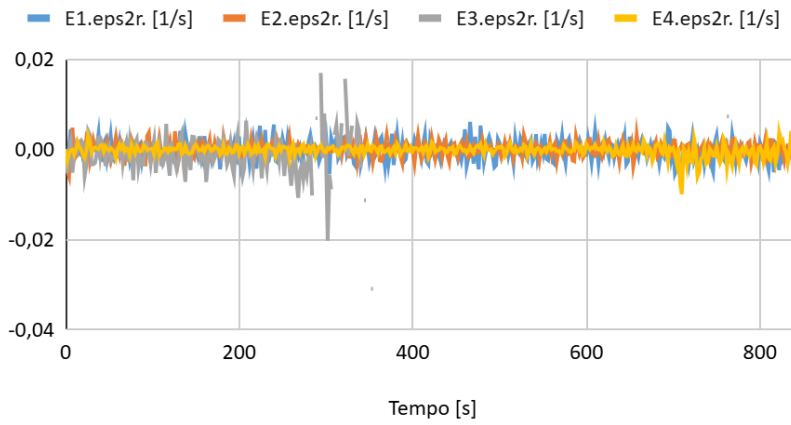


Figura 95 - Tempo(s) vs Velocidade de deformação(1/s): (Prisma 5).

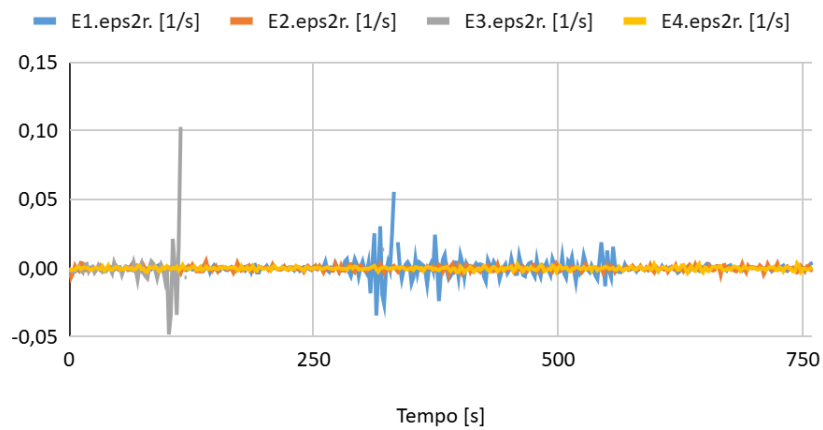


Figura 96 - Tempo(s) vs Velocidade de deformação(1/s): (Prisma 6).

APÊNDICE 3 - Pequenas Paredes

3.1 Deformação das Pequenas Paredes

As figuras 97, 98 e 99 ilustram claramente o comportamento de cada componente da estrutura sob a carga aplicada. O gráfico analisa a deformação (em milímetros) como uma porcentagem ao longo do período de teste, ou seja, o tempo, expresso em segundos, necessário para que a estrutura sofra falha.

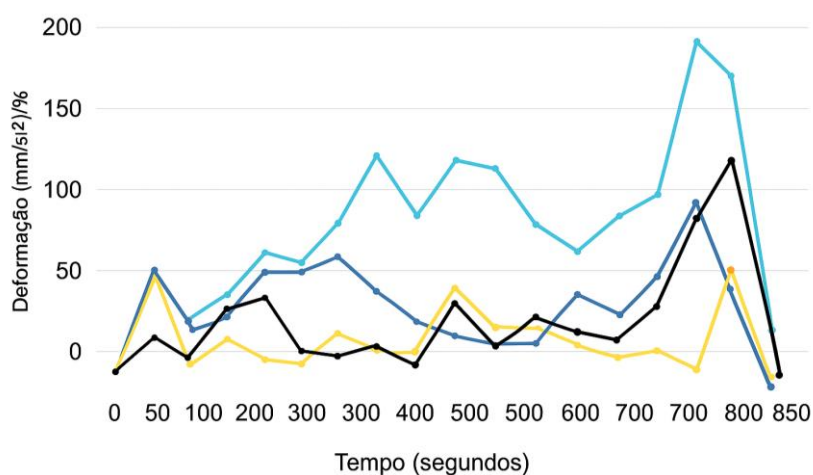


Figura 97 - Gráfico de deformação da pequena parede 1.

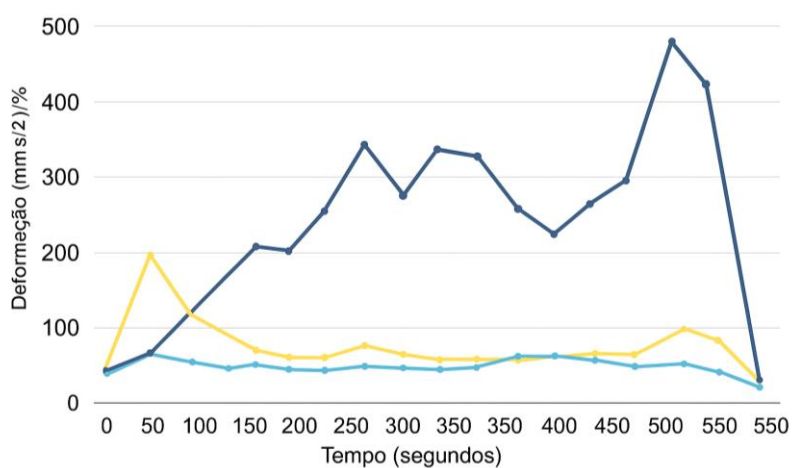


Figura 98 - Gráfico de deformação da pequena parede 2.

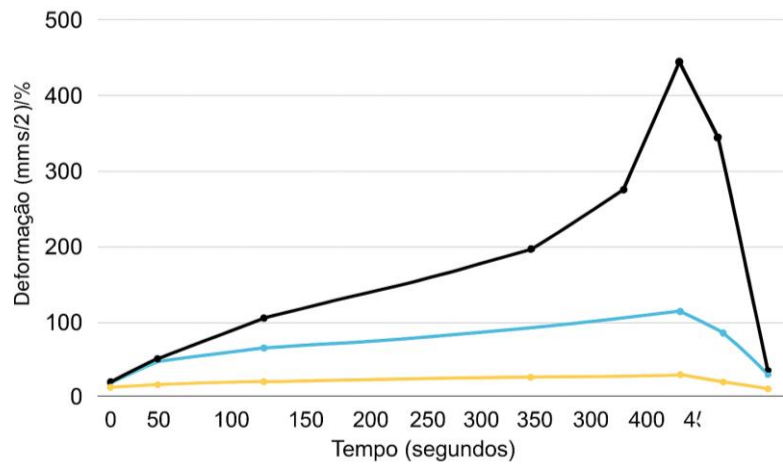


Figura 99 - Gráfico de deformação da pequena parede 3.

3.2 Ruptura das Pequenas Paredes



Figura 100 - Diferentes regiões de ruptura das Paredes.

APÊNDICE 4 – MODELAGEM NUMÉRICA

4.1 Ambiente de modelagem da geometria

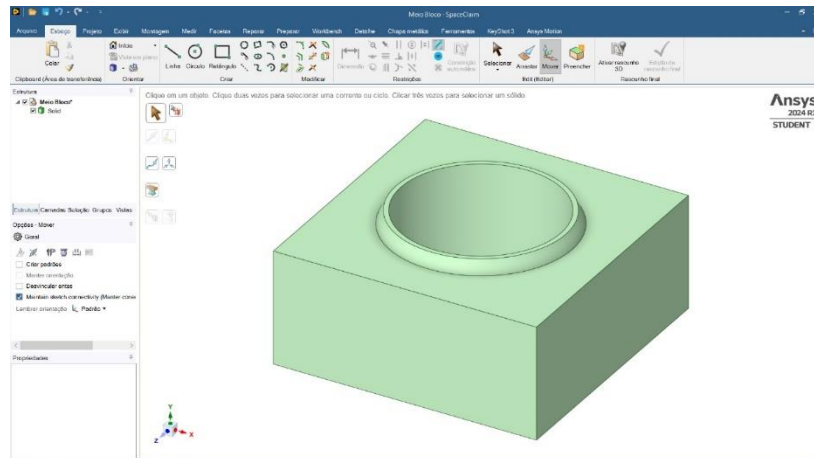


Figura 101 - Meio bloco (*SpaceClaim*).

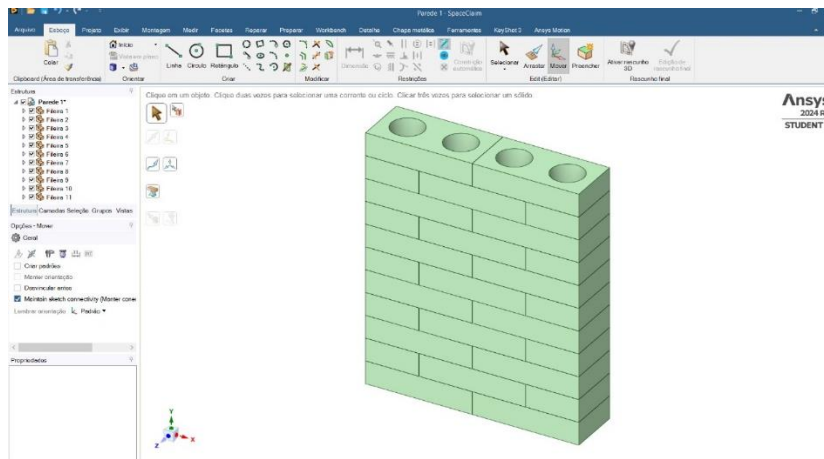


Figura 102 - Parede estrutural (*SpaceClaim*).

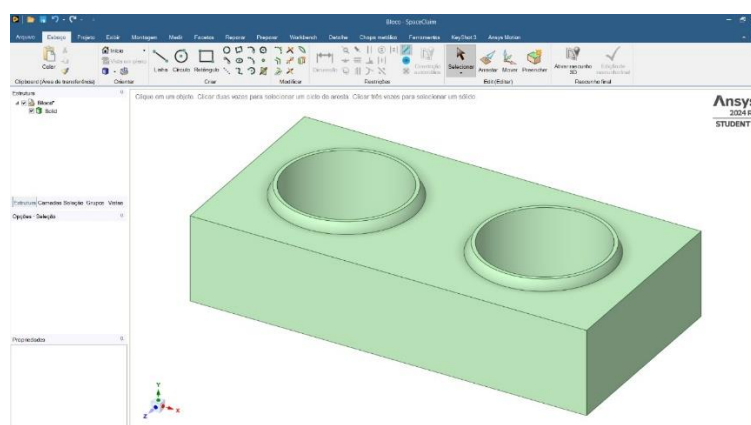


Figura 103 - Bloco Estrutural (*SpaceClaim*).

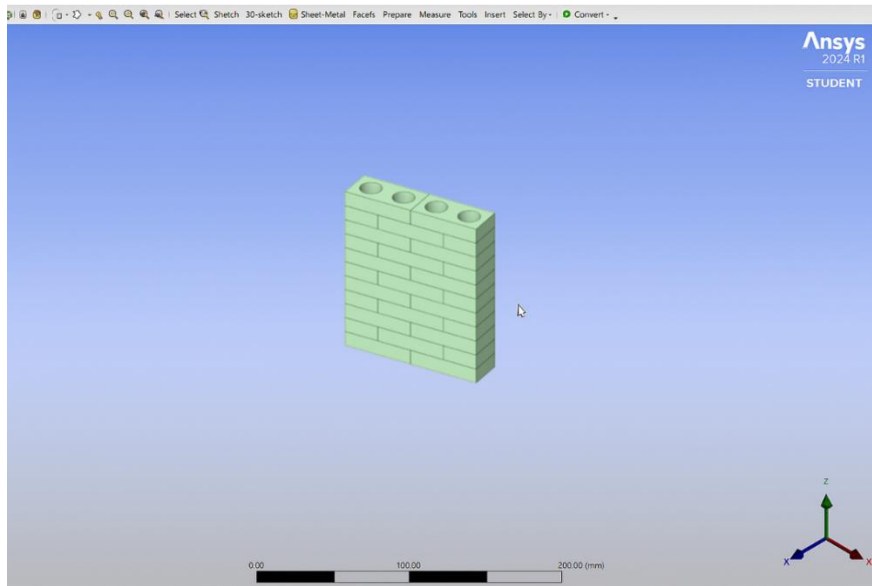


Figura 104 – SpaceClaim.

4.2 Fissuras Internas na Estrutura

A Figura permite visualizar as fissuras em determinada região da estrutura, evidenciando fissuras nas laterais e com maior abertura no centro.



Figura 105 - Regiões de Fissuras.

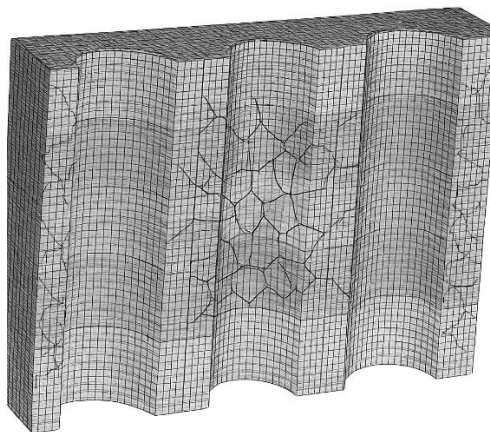


Figura 106 - Regiões de Fissuras. (Preto e Branco).

4.3 Gráfico de Frequências Naturais

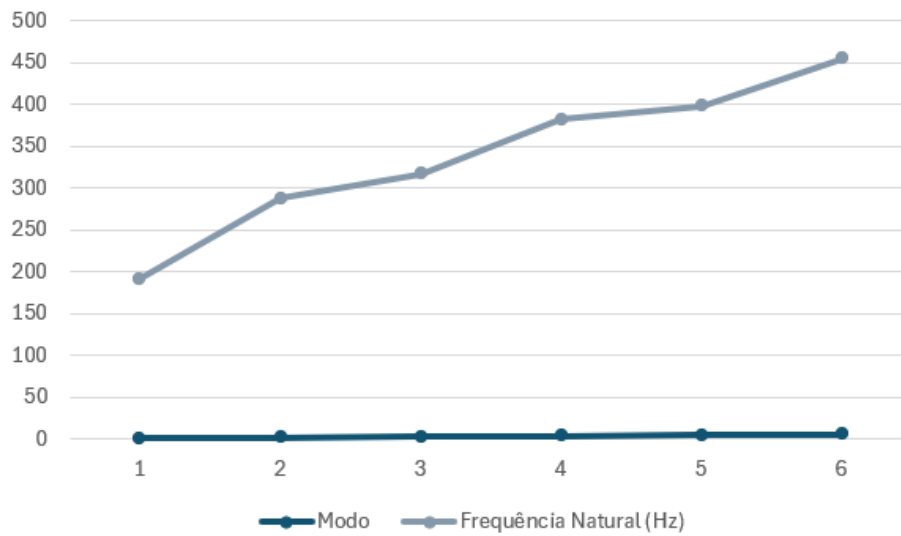


Figura 107 – Gráfico: Modo vs Frequências Naturais.

4.4 Deslocamentos RMS em (mm)

Tabela 26 - Deslocamentos RMS.

| Modo | Deslocamento RMS (mm) |
|--------|-----------------------|
| Modo 1 | 2,58 mm |
| Modo 2 | 0,16 mm |
| Modo 3 | 0,035 mm |
| Modo 4 | 0,013 mm |
| Modo 5 | 0,006 mm |
| Modo 6 | 0,003 mm |

4.5 Relatório do Ansys

Descrição do Modelo

Geometria: parede composta por blocos cerâmicos estruturais extrudados, 2 blocos na largura × 11 fiadas de altura.

Assunções: não linearidade geométrica, material isotrópico, acoplamento contato/adesão entre blocos (sim).

Software: ANSYS Workbench / Mechanical (versão: 2024/R1).

Propriedades dos Materiais

| Componente | Densidade (g/cm ³) | E (MPa) | ν | Observações |
|----------------|--------------------------------|----------|------------------|-------------------|
| Bloco cerâmico | <<1,18>> | <<2916>> | << ν bloco>> | Queimado em 900°C |

Malha

- Tipo de elemento: <<tipo (SOLID185)>>
- Tamanho aproximado do elemento: <<mm>>
- Número total de nós: <<588.360 / nós>>
- Número total de elementos: <<192.721 / elem.>>

Condições de Contorno e Contatos

Apoios | Identificador | Tipo de apoio | Localização / descrição | |—|—|—| | Apoio 1 | <<Fixed>> | <<coord (x,y,z) >>

Contatos | Par de contato | Tipo de contato (bonded) | Coef. atrito (não aplicável).

Estática | Carga – Compressão | Magnitude | Local (y) | superfície | Topo | Gravidade | <<g=9.81 m/s²>> | - | | Carga concentrada | Força | <<N>> | <<coord/face>> |

Dinâmica | Carga dinâmica | Tipo (harmônica/PSD/impulsiva) | Amplitude | Frequência/Espectro | Máquina industrial | <<PSD/harmonic>> | <<amp>> | <<f (Hz) ou PSD>> |

Figura 108 - Relatório Ansys / Adaptado.